

ARGAMASSAS DE REPARAÇÃO

PEDRO JOÃO DE ALMEIDA FERREIRA DA SILVA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM MATERIAIS E PROCESSOS DE
CONSTRUÇÃO**

Orientador: Professora Doutora Madalena Maria Matos Silva Teles

JULHO DE 2008

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2007/2008

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2007/2008 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2008*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

À memória do meu Pai,
à minha Mãe e
à Rita

Give me a lever long enough and a fulcrum on which to place it, and I shall move the world.

Archimedes

AGRADECIMENTOS

Um trabalho não é obra de uma só pessoa, mas sim o resultado de um esforço colectivo desenvolvido com o apoio e incentivo de diversas pessoas.

Foram vários os intervenientes que contribuíram para a realização deste trabalho, desejando expressar a todos o meu agradecimento.

À Professora Doutora Madalena Teles, sob cuja orientação decorreu a realização deste trabalho, desejo expressar um agradecimento muito especial pelos seus ensinamentos e rigor científico, empenho, amizade e apoio entusiástico constante.

Ao Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção e, em particular ao Professor Doutor Afonso Serra Neves, pela facilidade prestada na execução dos ensaios, e aos técnicos Sr. Fernando Hora, Sr. Manuel Cardoso e à Sr.^a Patrícia Pereira pelo cuidado prestado na preparação e execução de diversos ensaios.

À Professora Doutora Joana de Sousa Coutinho, pelo auxílio prestado na realização do ensaio para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos.

Ao Professor Doutor Quintanilha de Menezes, pela realização dos ensaios de aderência na máquina de corte.

Ao Professor Doutor Arlindo Begonha, pelo auxílio e ensinamentos prestados no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Ao Professor Doutor Joaquim Figueiras, pela disponibilização da câmara de carbonatação do LABEST (Laboratório do Betão estrutural).

À Sr.^a Eng.^a Paula Silva, técnica do LABEST, pela realização dos ensaios de pull-off.

À Sr.^a Dr.^a Daniela Silva do Centro de Materiais da Universidade do Porto, pela disponibilidade e esforço prestados, indispensáveis na execução dos ensaios de microscopia electrónica de varrimento.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil e, em especial Sr. Eng. Arlindo Gonçalves, chefe do Núcleo de Betões, e ao Doutor Bettencourt Ribeiro, pelas facilidades concedidas na execução dos ensaios de resistência ao desgaste por abrasão.

À Unibetão e, em particular, ao Sr. Eng. Juliano Barbosa, pela cedência das cinzas volantes, essenciais para a realização desta dissertação.

À SECIL, especialmente à Sr.^a Eng.^a Raquel Figueira, pelo fornecimento do cimento que possibilitou o estudo das argamassas.

RESUMO

O presente trabalho tem como objectivo avaliar a influência da utilização de cinzas volantes como substituição de parte do cimento em argamassas estruturais de reparação.

Na primeira parte do trabalho apresentam-se os conceitos gerais sobre cinzas volantes e efectua-se o estado da arte sobre a utilização de cinzas em betões e argamassas.

Na segunda parte do trabalho, com uma forte componente experimental, desenvolve-se um estudo sistemático das propriedades de argamassas estruturais de reparação com adição de cinzas volantes em percentagens de 45%, 50% e 60%, consistindo essencialmente em:

- fabricar argamassas de baixo custo para a reparação de estruturas de betão, utilizando cinzas volantes como substituto parcial do cimento portland;
- caracterizar o comportamento físico, mecânico e químico das argamassas, dando especial relevo às propriedades que caracterizam o meio poroso e a durabilidade deste material;
- avaliar a adequação do uso destas argamassas na reparação de estruturas.

PALAVRAS-CHAVE: argamassas cimentícias, argamassas de reparação, cinzas volantes, durabilidade, substituto parcial do cimento portland.

ABSTRACT

The main objective of the present work is to assess the influence of fly ash, as a partial replacement of Portland cement, on structural mortars for concrete repair.

The current knowledge regarding the main properties of fly ash when used in concrete and mortars is discussed on the first part of this work.

On the second part of this paper a comprehensive experimental analysis is carried out, in order to characterize the main properties of hi volume fly ash mortars for the repair of concrete structures, which consisted on:

- fabricating low cost mortars for the repair of concrete structures using fly ash as partial replacement for Portland cement;
- characterize the physical, mechanical and chemical behavior of the mortars, with special attention on the properties regarding durability and the study of the pore matrix;
- Assess the possibility of using these mortars in the repair of concrete structures.

KEYWORDS: modified cement mortars, repair mortars, fly ash, durability, partial substitute of Portland cement.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. FUNDAMENTAÇÕES E OBJECTIVOS DO TRABALHO	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CONTEÚDOS DA DISSERTAÇÃO	4
2. AS CINZAS VOLANTES NOS MATERIAIS CIMENTÍCIOS	5
2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. TIPOS E CARACTERÍSTICAS DE CINZAS VOLANTES	7
2.2.1. TIPOS DE CINZAS VOLANTES	7
2.2.2. CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS VOLANTES	8
2.2.2.1. Considerações gerais	8
2.2.2.2. Propriedades físicas	9
2.2.2.3. Propriedades químicas	12
2.2.2.4. Imposições normativas	15
2.2.3. INFLUÊNCIA DAS CINZAS VOLANTES NAS PROPRIEDADES DO BETÃO	16
2.2.3.1. Considerações gerais	16
2.2.3.2. Betão fresco	17
2.2.3.3. Betão endurecido	18
3. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	23
3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	23
3.2. AGREGADOS	24
3.3. CIMENTO	24
3.4. CINZAS VOLANTES	28
3.5. ARGAMASSAS	32

4. PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS COM CINZAS VOLANTES. ESTUDO EXPERIMENTAL	35
4.1. INTRODUÇÃO	35
4.2. LISTA DOS ENSAIOS REALIZADOS	36
4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	37
4.3.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO	37
4.3.1.1. Descrição do ensaio	37
4.3.1.2. Apresentação dos resultados	37
4.3.1.3. Discussão dos resultados	37
4.3.2. TEMPOS DE PRESA	38
4.3.2.1. Descrição do ensaio	38
4.3.2.2. Apresentação dos resultados	38
4.3.2.3. Discussão dos resultados	39
4.3.3. RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E À FLEXÃO	39
4.3.3.1. Descrição do ensaio	39
4.3.3.2. Apresentação dos resultados	41
4.3.3.3. Discussão dos resultados	42
4.3.4. RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO	44
4.3.4.1. Descrição do ensaio	44
4.3.4.2. Apresentação dos resultados	44
4.3.4.3. Discussão dos resultados	45
4.3.5. ADERÊNCIA – ENSAIO DE CORTE	45
4.3.5.1. Descrição do ensaio	45
4.3.5.2. Apresentação dos resultados	46
4.3.5.3. Discussão dos resultados	48
4.3.6. POROSIDADE LIVRE	49
4.3.6.1. Descrição do ensaio	49
4.3.6.2. Apresentação dos resultados	50
4.3.6.3. Discussão dos resultados	50
4.3.7. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	51
4.3.7.1. Descrição do ensaio	51
4.3.7.2. Apresentação dos resultados	52
4.3.7.3. Discussão dos resultados	54

4.3.8. ENSAIO DE EVAPORAÇÃO	59
4.3.8.1. Descrição do ensaio	59
4.3.8.2. Apresentação dos resultados	60
4.3.8.3. Discussão dos resultados	61
4.3.9. PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DA ÁGUA SOB PRESSÃO	62
4.3.9.1. Descrição do ensaio	62
4.3.9.2. Apresentação dos resultados	63
4.3.9.3. Discussão dos resultados	64
4.3.10. DISSOLUÇÃO/CRISTALIZAÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS	64
4.3.10.1. Descrição do ensaio	64
4.3.10.2. Apresentação dos resultados	66
4.3.10.3. Discussão dos resultados	66
4.3.11. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO ACELERADA	68
4.3.11.1. Descrição do ensaio	68
4.3.11.2. Apresentação dos resultados	69
4.3.11.3. Discussão dos resultados	71
4.3.12. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS	71
4.3.12.1. Descrição do ensaio	71
4.3.12.2. Apresentação dos resultados	75
4.3.12.3. Discussão dos resultados	76
4.3.13. RESISTIVIDADE ELÉCTRICA	76
4.3.13.1. Descrição do ensaio	76
4.3.13.2. Apresentação dos resultados	76
4.3.13.3. Discussão dos resultados	77
4.3.14. RESISTÊNCIA AO CALOR	77
4.3.14.1. Descrição do ensaio	77
4.3.14.2. Apresentação dos resultados	78
4.3.14.3. Discussão dos resultados	79
4.4. ESTUDO PETROGRÁFICO DAS ARGAMASSAS	79
 5. CONCLUSÃO E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS	 87
 BIBLIOGRAFIA	 91

A1. ANEXO 1 – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E À FLEXÃO	A.1
A2. ANEXO 2 – RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO	A.9
A3. ANEXO 3 – POROSIDADE LIVRE	A.11
A4. ANEXO 4 – ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	A.13
A5. ANEXO 5 – ENSAIO DE EVAPORAÇÃO	A.39
A6. ANEXO 6 – ENSAIO DE DISSOLUÇÃO/CRISTALIZAÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS	A.65
A7. ANEXO 7 – RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO ACELERADA	A.67
A8. ANEXO 8 – RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS	A.69
A9. ANEXO 9 – RESISTÊNCIA AO CALOR	A.71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Peso da Indústria Cimenteira nas emissões totais de CO ₂ em Portugal (dados relativos a 2005).	3
Figura 2.1 – Diferentes aspectos de cinzas volantes (Teles, 2002)	9
Figura 2.2 – Cinza volante de superfície porosa (Begonha, 2001).....	9
Figura 2.3 - Diâmetros de cinzas volantes	10
Figura 3.1 – Imagens e espectros de partículas de cimento	27
Figura 3.2 – Diâmetros de partículas de cinzas volantes	29
Figura 3.3 – Cinzas volantes com diferentes texturas	30
Figura 3.4 – Imagens e espectros de partículas de cinzas volantes	31
Figura 4.1 – Equipamento para a determinação da consistência por espalhamento.....	37
Figura 4.2 – Ensaio para determinação dos tempos de presa.	39
Figura 4.3 – Fabrico dos provetes de argamassa.....	40
Figura 4.4 – Ensaio para determinação da resistência à flexão.	40
Figura 4.5 – Ensaio para determinação da resistência à compressão	41
Figura 4.6 – Evolução da resistência à compressão das argamassas.....	42
Figura 4.7 – Evolução da resistência à flexão das argamassas.....	42
Figura 4.8 – Razão entre as resistências à compressão das argamassas com cinzas volantes e da argamassa padrão, para cada idade.	43
Figura 4.9 – Razão entre as resistências à flexão das argamassas com cinzas volantes e da argamassa padrão, para cada idade.	43
Figura 4.10 – Colocação do betão nos moldes até 75 mm de altura.	45
Figura 4.11 – Máquina para o ensaio de corte.	46
Figura 4.12 – Provetes depois de serem ensaiados.....	46
Figura 4.13 – Tensão de corte para a argamassa padrão.....	47
Figura 4.14 – Tensão de corte para a argamassa AM1 (45% CV).....	47
Figura 4.15 – Tensão de corte para a argamassa AM0 (50% CV).....	47
Figura 4.16 – Superfície de rotura.	48
Figura 4.17 – Ensaio para determinação da porosidade livre.	50
Figura 4.18 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.	52

Figura 4.19 – Curvas de absorção de água por capilaridade para cada uma das argamassas.....	53
Figura 4.20 – Curvas médias de absorção de água por capilaridade para cada argamassa.....	54
Figura 4.21 – Comparação entre as curvas médias das argamassas padrão para o ensaio de absorção capilar do presente trabalho e de Mota Miranda (2006).	55
Figura 4.22 – Coeficientes de absorção de todas as argamassas.	56
Figura 4.23 – Coeficientes de absorção para cada uma das argamassas.	57
Figura 4.24 – Diferença percentual dos coeficientes de absorção relativamente a AMP, para cada conjunto de provetes.	58
Figura 4.25 – Ensaio de evaporação.....	59
Figura 4.26 – Curvas de evaporação para cada uma das argamassas.	60
Figura 4.27 – Curvas médias de evaporação de água das argamassas.....	61
Figura 4.28 – Dispositivo de ensaio para a penetração de água sob pressão.	62
Figura 4.29 – Ensaio de penetração de água sob pressão.....	63
Figura 4.30 – Visualização da linha de penetração de água após abertura dos provetes.	63
Figura 4.31 – Ensaio de dissolução/cristalização de sais solúveis.....	66
Figura 4.32 – Aspecto final dos provetes, após lavagem e secagem.....	67
Figura 4.33 – Provetes no final do ensaio, antes de serem lavados	68
Figura 4.34 – Câmara de carbonatação e provetes.....	69
Figura 4.35 – Argamassa de referência	70
Figura 4.36 – Argamassa AM1 (45% CV).	70
Figura 4.37 – Argamassa AM0 (50% CV).	70
Figura 4.38 – Argamassa AM2 (60% CV).	70
Figura 4.39 – Provetes utilizados para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos	72
Figura 4.40 – Câmara de vácuo	72
Figura 4.41 – Células de ensaio já montadas	72
Figura 4.42 – Ensaio de seis provetes para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos nas argamassas em estudo	73
Figura 4.43 – Provetes após seccionamento e pulverização com nitrato de prata	73
Figura 4.44 – Esquema da medição das profundidades de penetração dos cloretos	74
Figura 4.45 – Medição das profundidades de penetração dos cloretos, com auxílio de um paquímetro digital.....	74
Figura 4.46 – Resistências à compressão das argamassas aos 210 dias, com e sem aquecimento..	78
Figura 4.47 – Resistências à flexão das argamassas aos 210 dias, com e sem aquecimento.....	78
Figura 4.48 – Imagem e espectro global da superfície da argamassa de referência.	80
Figura 4.49 – Imagens e espectro de carbonato de cálcio à superfície da argamassa de referência.	80

Figura 4.50 – Imagem e espectro global da argamassa de referência para cerca de 3 mm de profundidade.....	80
Figura 4.51 – Imagem e espectro global da superfície da argamassa com 45% de cinzas volantes ...	81
Figura 4.52 – Imagens e espectro de carbonato de cálcio e cinzas volantes à superfície da argamassa com 45% de cinzas	81
Figura 4.53 – Imagem e espectro global da argamassa com 45% de cinzas a cerca de 3 mm de profundidade.....	82
Figura 4.54 – Imagem de carbonato de cálcio a cerca de 3 mm de profundidade na argamassa com 45% de cinzas	82
Figura 4.55 – Imagem e espectro global da superfície da argamassa com 50% de cinzas volantes ...	83
Figura 4.56 – Imagens de calcite e algumas cinzas na superfície da argamassa com 50% de cinzas volantes	83
Figura 4.57 – Imagem e espectro global da superfície a cerca de 3 mm de profundidade da argamassa com 50% de cinzas volantes.....	84
Figura 4.58 – Imagem e espectro global da superfície da argamassa com 60% de cinzas volantes ...	84
Figura 4.59 – Imagens de carbonato de cálcio e cinzas volantes na argamassa com 60% de cinzas.	85
Figura 4.60 – Imagem e espectro global da superfície a cerca de 3 mm de profundidade da argamassa com 60% de cinzas volantes.....	85
Figura 4.61 – Imagem da superfície a cerca de 3 mm de profundidade da argamassa com 60% de cinzas, mostrando uma grande quantidade de cinzas volantes	86
 Figura A7.1 – Medição da profundidade de carbonatação.	A.67

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Evolução das emissões totais de gases de efeito de estufa, excluindo contribuição do uso do solo (UNFCCC, 2007).	2
Quadro 2.1 – Propriedades físicas de 14 cinzas volantes provenientes do Canadá (Joshi e Marsh, 1987)	11
Quadro 2.2 – Propriedades físicas de cinzas volantes portuguesas (Cabaço, 1988; Rocha, 1999).....	12
Quadro 2.3 – Composição química de 14 cinzas volantes provenientes do Canadá (Joshi e Marsh, 1987)	13
Quadro 2.4 – Propriedades químicas de cinzas volantes portuguesas (Cabaço, 1988; Rocha, 1999)	13
Quadro 2.5 – Requisitos químicos e físicos a exigir às cinzas volantes.....	16
Quadro 2.6 – Variação da probabilidade de corrosão com a resistividade do material cimentício (ACI 222R-01, 2003)	22
Quadro 3.1 – Composição granulométrica do agregado utilizado nas argamassas (NP EN 196-1, 1996)	24
Quadro 3.2 – Composição granulométrica do agregado determinada experimentalmente	24
Quadro 3.3 – Boletim de autocontrolo da remessa de cimento utilizada.....	25
Quadro 3.4 – Comparação entre os valores experimentais e os fornecidos no boletim de autocontrolo (média mensal).....	26
Quadro 3.5 – Percentagens dos componentes principais do cimento.....	26
Quadro 3.6 – Composição química de sete partículas de cimento	28
Quadro 3.7 – Boletim de autocontrolo das cinzas volantes.....	29
Quadro 3.8 – Composição química das cinzas volantes	32
Quadro 3.9 – Composição das argamassas estudadas	32
Quadro 4.1 – Lista dos ensaios realizados	36
Quadro 4.2 – Valores da consistência das argamassas.....	37
Quadro 4.3 – Composição das argamassas para a determinação dos tempos de presa (pasta de consistência normal).....	38
Quadro 4.4 – Tempos de presa das diversas argamassas	39
Quadro 4.5 – Resistências à compressão das argamassas.....	41
Quadro 4.6 – Resistências à flexão das argamassas.....	42

Quadro 4.7 – Valores médios da resistência ao desgaste por abrasão	44
Quadro 4.8 – Composição do betão de controlo.....	45
Quadro 4.9 – Porosidade livre dos provetes de argamassa	50
Quadro 4.10 – Profundidade máxima de penetração da água	63
Quadro 4.11 – Principais minerais de sais solúveis – composições químicas e volumes molares (Begonha, 2001).....	65
Quadro 4.12 – Variação da massa dos provetes	66
Quadro 4.13 – Profundidades médias de carbonatação.....	69
Quadro 4.14 – Profundidade de penetração dos cloretos.....	75
Quadro 4.15 – Coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário.....	75
Quadro 4.16 – Intensidade de corrente inicial e resistividade eléctrica das diferentes argamassas ...	77
Quadro 4.17 – Resistência à flexão das argamassas aos 210 dias, após 28 dias a 105°C.....	78
Quadro 4.18 – Resistência à compressão das argamassas aos 210 dias, após 28 dias a 105°C	78
Quadro 4.19 – Diferenças percentuais das resistências mecânicas aos 210 dias, com e sem aquecimento	79
Quadro A1.1 – Resistências à compressão e à flexão aos dois dias.	A.2
Quadro A1.2 – Resistências à compressão e à flexão aos sete dias.	A.3
Quadro A1.3 – Resistências à compressão e à flexão aos 28 dias.	A.4
Quadro A1.4 – Resistências à compressão e à flexão aos 61 dias.	A.5
Quadro A1.5 – Resistências à compressão e à flexão aos 91 dias.	A.6
Quadro A1.6 – Resistências à compressão e à flexão aos 210 dias.	A.7
Quadro A2.1 – Desgaste por abrasão de cada um dos provetes.	A.10
Quadro A3.1 – Porosidade livre dos diversos provetes da argamassa padrão.	A.11
Quadro A3.2 – Porosidade livre dos diversos provetes da argamassa com 45% de cinzas.	A.11
Quadro A3.3 – Porosidade livre dos diversos provetes da argamassa com 50% de cinzas.	A.12
Quadro A3.4 – Porosidade livre dos diversos provetes da argamassa com 60% de cinzas.	A.12
Quadro A4.1 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 1.	A.13
Quadro A4.2 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 2.	A.14
Quadro A4.3 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 3.	A.14
Quadro A4.4 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 4.	A.15

Quadro A4.5 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 5.....	A.15
Quadro A4.6 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 6.....	A.16
Quadro A4.7 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 7.....	A.16
Quadro A4.8 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 8.....	A.17
Quadro A4.9 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 9.....	A.17
Quadro A4.10 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 10.....	A.18
Quadro A4.11 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 11.....	A.18
Quadro A4.12 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 12.....	A.19
Quadro A4.13 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 1 (45% CV).....	A.19
Quadro A4.14 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 2 (45% CV).....	A.20
Quadro A4.15 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 3 (45% CV).....	A.20
Quadro A4.16 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 4 (45% CV).....	A.21
Quadro A4.17 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 5 (45% CV).....	A.21
Quadro A4.18 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 6 (45% CV).....	A.22
Quadro A4.19 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 7 (45% CV).....	A.22
Quadro A4.20 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 8 (45% CV).....	A.23
Quadro A4.21 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 9 (45% CV).....	A.23
Quadro A4.22 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 10 (45% CV).....	A.24
Quadro A4.23 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 11 (45% CV).....	A.24
Quadro A4.24 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 12 (45% CV).....	A.25
Quadro A4.25 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 1 (50% CV).....	A.25
Quadro A4.26 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 2 (50% CV).....	A.26
Quadro A4.27 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 3 (50% CV).....	A.26
Quadro A4.28 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 4 (50% CV).....	A.27
Quadro A4.29 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 5 (50% CV).....	A.27
Quadro A4.30 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 6 (50% CV).....	A.28
Quadro A4.31 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 7 (50% CV).....	A.28
Quadro A4.32 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 8 (50% CV).....	A.29
Quadro A4.33 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 9 (50% CV).....	A.29
Quadro A4.34 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 10 (50% CV).....	A.30
Quadro A4.35 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 11 (50% CV).....	A.30
Quadro A4.36 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 12 (50% CV).....	A.31
Quadro A4.37 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 1 (60% CV).....	A.31

Quadro A4.38 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 2 (60% CV).....	A.32
Quadro A4.39 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 3 (60% CV).....	A.32
Quadro A4.40 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 4 (60% CV).....	A.33
Quadro A4.41 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 5 (60% CV).....	A.33
Quadro A4.42 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 6 (60% CV).....	A.34
Quadro A4.43 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 7 (60% CV).....	A.34
Quadro A4.44 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 8 (60% CV).....	A.35
Quadro A4.45 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 9 (60% CV).....	A.35
Quadro A4.46 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 10 (60% CV).....	A.36
Quadro A4.47 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 11 (60% CV).....	A.36
Quadro A4.48 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 12 (60% CV).....	A.37
Quadro A5.1 – Ensaio de evaporação, provete AMP 1.	A.39
Quadro A5.2 – Ensaio de evaporação, provete AMP 2.	A.40
Quadro A5.3 – Ensaio de evaporação, provete AMP 3.	A.40
Quadro A5.4 – Ensaio de evaporação, provete AMP 4.	A.41
Quadro A5.5 – Ensaio de evaporação, provete AMP 5.	A.41
Quadro A5.6 – Ensaio de evaporação, provete AMP 6.	A.42
Quadro A5.7 – Ensaio de evaporação, provete AMP 7.	A.42
Quadro A5.8 – Ensaio de evaporação, provete AMP 8.	A.43
Quadro A5.9 – Ensaio de evaporação, provete AMP 9.	A.43
Quadro A5.10 – Ensaio de evaporação, provete AMP 10.	A.44
Quadro A5.11 – Ensaio de evaporação, provete AMP 11.	A.44
Quadro A5.12 – Ensaio de evaporação, provete AMP 12.	A.45
Quadro A5.13 – Ensaio de evaporação, provete AM1 1 (45% CV).	A.45
Quadro A5.14 – Ensaio de evaporação, provete AM1 2 (45% CV).	A.46
Quadro A5.15 – Ensaio de evaporação, provete AM1 3 (45% CV).	A.46
Quadro A5.16 – Ensaio de evaporação, provete AM1 4 (45% CV).	A.47
Quadro A5.17 – Ensaio de evaporação, provete AM1 5 (45% CV).	A.47
Quadro A5.18 – Ensaio de evaporação, provete AM1 6 (45% CV).	A.48
Quadro A5.19 – Ensaio de evaporação, provete AM1 7 (45% CV).	A.48
Quadro A5.20 – Ensaio de evaporação, provete AM1 8 (45% CV).	A.49
Quadro A5.21 – Ensaio de evaporação, provete AM1 9 (45% CV).	A.49

Quadro A5.22 – Ensaio de evaporação, provete AM1 10 (45% CV).....	A.50
Quadro A5.23 – Ensaio de evaporação, provete AM1 11 (45% CV).....	A.50
Quadro A5.24 – Ensaio de evaporação, provete AM1 12 (45% CV).....	A.51
Quadro A5.25 – Ensaio de evaporação, provete AM0 1 (50% CV).....	A.51
Quadro A5.26 – Ensaio de evaporação, provete AM0 2 (50% CV).....	A.52
Quadro A5.27 – Ensaio de evaporação, provete AM0 3 (50% CV).....	A.52
Quadro A5.28 – Ensaio de evaporação, provete AM0 4 (50% CV).....	A.53
Quadro A5.29 – Ensaio de evaporação, provete AM0 5 (50% CV).....	A.53
Quadro A5.30 – Ensaio de evaporação, provete AM0 6 (50% CV).....	A.54
Quadro A5.31 – Ensaio de evaporação, provete AM0 7 (50% CV).....	A.54
Quadro A5.32 – Ensaio de evaporação, provete AM0 8 (50% CV).....	A.55
Quadro A5.33 – Ensaio de evaporação, provete AM0 9 (50% CV).....	A.55
Quadro A5.34 – Ensaio de evaporação, provete AM0 10 (50% CV).....	A.56
Quadro A5.35 – Ensaio de evaporação, provete AM0 11 (50% CV).....	A.56
Quadro A5.36 – Ensaio de evaporação, provete AM0 12 (50% CV).....	A.57
Quadro A5.37 – Ensaio de evaporação, provete AM2 1 (60% CV).....	A.57
Quadro A5.38 – Ensaio de evaporação, provete AM2 2 (60% CV).....	A.58
Quadro A5.39 – Ensaio de evaporação, provete AM2 3 (60% CV).....	A.58
Quadro A5.40 – Ensaio de evaporação, provete AM2 4 (60% CV).....	A.59
Quadro A5.41 – Ensaio de evaporação, provete AM2 5 (60% CV).....	A.59
Quadro A5.42 – Ensaio de evaporação, provete AM2 6 (60% CV).....	A.60
Quadro A5.43 – Ensaio de evaporação, provete AM2 7 (60% CV).....	A.60
Quadro A5.44 – Ensaio de evaporação, provete AM2 8 (60% CV).....	A.61
Quadro A5.45 – Ensaio de evaporação, provete AM2 9 (60% CV).....	A.61
Quadro A5.46 – Ensaio de evaporação, provete AM2 10 (60% CV).....	A.62
Quadro A5.47 – Ensaio de evaporação, provete AM2 11 (60% CV).....	A.62
Quadro A5.48 – Ensaio de evaporação, provete AM2 12 (60% CV).....	A.63
 Quadro A6.1 – Variação da massa dos provetes no ensaio de dissolução/cristalização de sais solúveis	A.66
 Quadro A7.1 – Profundidade de carbonatação dos diversos provetes.	A.67

Quadro A8.1 – Profundidades de penetração dos cloretos e coeficientes de difusão (D) dos diversos provetes.....A.69

Quadro A9.1 – Resistência à flexão e à compressão de cada um dos provetes no ensaio de resistência ao calor.....A.72

INTRODUÇÃO

1.1. FUNDAMENTAÇÕES E OBJECTIVOS DO TRABALHO

Actualmente, a reparação de estruturas de betão tem vindo a ganhar uma importância cada vez maior na actividade do sector da construção civil. Por um lado, há estruturas que, por terem atingido o fim da sua vida útil, necessitam de reparação. Por outro lado, cada vez mais estruturas apresentam uma degradação precoce que surge muito antes do previsto, tendo em conta o desempenho esperado para os diversos materiais.

Para fazer face a este problema existem diversos sistemas e produtos no mercado nacional para a reparação de estruturas de betão. Porém, torna-se difícil a selecção do sistema mais adequado para cada caso, em virtude de a informação técnica dos produtos fornecida pelos fabricantes ser essencialmente qualitativa. Cabe ao engenheiro civil efectuar um estudo aprofundado de modo a encontrar a melhor opção para cada caso, tendo em conta a economia da solução e as propriedades essenciais requeridas ao produto.

A NP EN 1504-1 (2006) permite a utilização de adições de materiais inorgânicos com propriedades pozolânicas em produtos e sistemas de reparação. As cinzas volantes são materiais pozolânicos, constituídos pelo resíduo finamente dividido da queima do carvão, pulverizado ou moído, que é arrastado nos gases de combustão. Ao queimar-se o carvão a parte combustível arde instantaneamente, enquanto a parte não combustível, essencialmente xistos e argilas, entra parcialmente em fusão. Dependendo do tipo de forno e da finura do carvão, algumas dessas partículas aglomeram-se numa espécie de clínquer, que cai no fundo do forno, dando origem à jorra. Outras, devido às suas pequenas dimensões, são transportadas nos gases de combustão, podendo ser captadas antes de saírem para a atmosfera. O material assim obtido, constituído fundamentalmente por partículas de forma aproximadamente esférica, com diâmetro médio de cerca de 10 μm , tem a designação de cinzas volantes (Coutinho, 1988).

As partículas de cinzas volantes, de reduzida dimensão e forma esférica, quando adicionadas ao cimento, modificam a rede porosa dos materiais cimentícios (betões e argamassas), levando a uma diminuição da porosidade destes materiais e, ao mesmo tempo, a uma redução do tamanho dos poros. Os benefícios da utilização de cinzas volantes como adições no betão e argamassas são inegáveis, permitindo a obtenção de misturas mais compactas e duráveis.

Enquanto que o estudo sistemático de propriedades de betões com cinzas volantes tem vindo a ser feito, desde há muitas décadas, por diversos autores nacionais e estrangeiros, não se conhecem estudos sistemáticos da influência deste tipo de adições em argamassas de reparação. Entre nós, Mota Miranda (2006) estuda propriedades de argamassas estruturais com adições de cinzas volantes, com

percentagens inferiores a 40%, e Rodrigues (2004) analisa argamassas não estruturais para a reparação de monumentos com cinzas volantes, sendo o ligante a cal hidráulica e não o cimento.

Por outro lado as cinzas volantes, como subproduto industrial que são, ao substituir parte do cimento contribuem para uma solução económica e ambientalmente viável. A componente ambiental é cada vez mais importante e não pode, de modo algum, ser desprezada. O ecossistema mundial tem vindo a ser fustigado por emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera cada vez maiores. Uma tonelada de cimento portland produzida conduz à libertação de aproximadamente uma tonelada de CO₂, sendo a indústria de cimento responsável por 7% das emissões totais deste gás a nível mundial (Malhotra, 1999).

Com a entrada em vigor do Protocolo de Quioto a 16 de Fevereiro de 2005, os países desenvolvidos que o ratificaram ficam obrigados a reduzir, no seu conjunto, as emissões de gases de efeito de estufa em, pelo menos, 5% relativamente aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012. No Quadro 1.1 são apresentados valores relativos à variação das emissões de gases de efeito de estufa de alguns países, segundo a UNFCCC (2007).

Quadro 1.1 – Evolução das emissões totais de gases de efeito de estufa, excluindo contribuição do uso do solo (UNFCCC, 2007).

País	Gg de CO ₂ equivalente					Variação 1990 – 2005
	1990	1995	2000	2004	2005	
Austrália	418 275	444 656	497 611	523 590	525 408	25,6
Bélgica	145 766	152 143	147 529	147 651	143 848	-1,3
Canadá	595 954	645 654	720 898	747 350	746 889	25,3
Rep. Checa	196 204	154 463	149 024	147 130	145 611	-25,8
Dinamarca	70 442	77 447	69 657	69 755	65 486	-7,0
Finlândia	71 000	71 537	70 016	80 896	69 241	-2,5
França	567 303	562 729	564 073	561 028	558 392	-1,6
Alemanha	1 227 860	1 095 654	1 019 764	1 024 957	1 001 476	-18,4
Grécia	108 742	113 195	131 756	137 633	137 633	26,6
Irlanda	55 374	59 372	69 127	68 659	69 945	26,3
Itália	516 851	530 264	551 594	577 859	579 548	12,1
Japão	1 272 043	1 343 636	1 347 622	1 356 989	1 359 914	6,9
Letónia	26 442	12 484	10 050	10 715	10 880	-58,9
Holanda	212 963	225 070	214 433	218 445	212 134	-0,4
Noruega	49 751	49 854	53 549	54 892	54 153	8,8
Polónia	586 903	453 170	405 078	396 651	398 952	-32,0
Portugal	59 921	71 127	82 260	84 660	85 540	42,8
Fed. Russa	2 989 833	2 092 063	1 987 315	2 086 409	2 132 518	-28,7
Espanha	287 366	318 370	384 419	425 236	440 649	53,3
Suécia	72 191	73 747	68 315	69 688	66 955	-7,3
Reino Unido	771 415	710 129	673 967	660 424	657 396	-14,8
EUA	6 229 041	6 560 936	7 125 881	7 189 715	7 241 482	16,3

As metas do Protocolo de Quioto para a UE implicam uma redução total de 8% das emissões relativamente ao ano de 1990. No entanto, em virtude do acordo de cooperação estabelecido, Portugal terá de atingir até ao final de 2012 um aumento máximo de emissões (relativamente a 1990) de 27%. Como se pode verificar no Quadro 1.1, em 2005 Portugal registava um aumento de 42,8%, valor bastante elevado face à meta pretendida.

Segundo a mesma fonte, os dados relativos exclusivamente às emissões de CO₂ para Portugal totalizam 67 918 Gg ou 67,918 milhões de toneladas em 2005. A produção nacional de cimento atingiu em 2005 cerca de 9 milhões de toneladas (IAPMEI, 2007), o que implica que a indústria do cimento tenha sido responsável, em 2005, pela libertação de 9 milhões de toneladas de CO₂. Assim, conjugando os dados do IAPMEI (2007) e da UNFCCC (2007), obtém-se o gráfico da Figura 1.1 que mostra o peso que a indústria cimenteira tem nas emissões nacionais de CO₂.

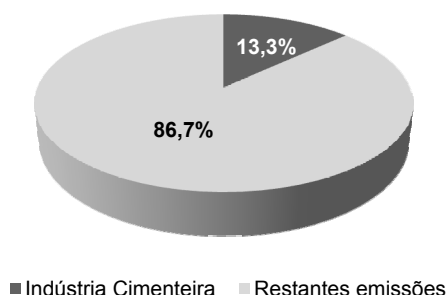


Figura 1.1 – Peso da Indústria Cimenteira nas emissões totais de CO₂ em Portugal (dados relativos a 2005).

Considerando, como referido, que a nível mundial a indústria do cimento é responsável por 7% das emissões de dióxido de carbono, facilmente se verifica que no panorama nacional esta indústria tem um peso consideravelmente maior na emissão de gases poluentes para a atmosfera.

O principal objectivo e motivação para a realização deste trabalho consistiram na avaliação da possibilidade de produzir argamassas para a reparação de estruturas de betão que cumpram os requisitos pretendidos para cada caso, nomeadamente, físicos e mecânicos, químicos, estéticos e de durabilidade, apostando, simultaneamente, numa solução mais vantajosa sob o ponto de vista económico e ambiental.

Em função do exposto julga-se importante efectuar um trabalho de investigação, necessariamente com uma forte componente experimental que, utilizando cinzas volantes como substituição de parte do cimento em argamassas estruturais de reparação, permita caracterizar as argamassas e contribuir para aumentar o conhecimento sobre os fenómenos de actuação das cinzas volantes no material cimentício.

Com este intuito, após se apresentarem os conceitos gerais sobre cinzas volantes e se efectuar o estado da arte sobre a utilização de cinzas em betões e argamassas, desenvolveu-se um estudo sistemático das propriedades de argamassas estruturais de reparação com adição de cinzas volantes em percentagens superiores a 45%, consistindo essencialmente em:

- fabricar argamassas de baixo custo para a reparação de estruturas de betão, utilizando cinzas volantes como substituto parcial do cimento portland;
- caracterizar o comportamento físico, mecânico e químico das argamassas, dando especial relevo às propriedades que caracterizam o meio poroso e a durabilidade deste material;
- avaliar a adequação do uso destas argamassas na reparação de estruturas.

1.2. ORGANIZAÇÃO DOS CONTEÚDOS DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é constituído por cinco capítulos, sendo o primeiro a presente Introdução.

Os aspectos fundamentais relativos aos conhecimentos actuais sobre o comportamento das cinzas volantes no betão e argamassas são tratados no Capítulo 2 (As cinzas volantes nos materiais cimentícios).

No Capítulo 3 (Caracterização dos materiais) inicia-se o trabalho experimental desta dissertação com a caracterização dos diferentes materiais usados (areia, cimento e cinzas volantes) na composição das argamassas.

No Capítulo 4 (Propriedades das argamassas com cinzas volantes. Estudo experimental) apresenta-se o programa experimental desenvolvido para as argamassas. Para cada ensaio, faz-se a descrição da metodologia utilizada, mostrando-se e discutindo-se os resultados obtidos, assim como as principais conclusões. O estudo petrográfico das argamassas é também apresentado, uma vez que serve de complemento à avaliação das propriedades das cinzas nas argamassas.

Finalmente, no Capítulo 5 (Conclusão e futuros desenvolvimentos) é feito um breve resumo das principais ilações resultantes deste trabalho e referem-se eventuais trabalhos futuros que possam dar continuidade a esta dissertação.

2

**AS CINZAS VOLANTES NOS
MATERIAIS CIMENTÍCIOS****2.1. INTRODUÇÃO**

As argamassas de reparação com incorporação de cinzas volantes são o objecto de estudo deste trabalho. As cinzas volantes são pozolanas, produtos naturais ou artificiais constituídos essencialmente por sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), que apresentam valores muito baixos ou, mais frequentemente, nulos para as propriedades hidráulicas, mas que na presença da água são dotados de grande reactividade ao hidróxido de cálcio.

As pozolanas não endurecem geralmente quando misturadas com a água, mas, se finamente moídas e em presença da água, reagem à temperatura ambiente com o hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dando origem a silicatos e aluminatos de cálcio, compostos semelhantes aos formados na hidratação do cimento, de grande estabilidade na água e com propriedades aglomerantes.

As pozolanas podem ser naturais, artificiais ou ainda subprodutos industriais.

As pozolanas naturais são rochas vulcânicas provenientes de magmas geralmente ácidos, ricos em sílica, que solidificaram rapidamente e que ficaram no estado amorfo, ou criptocristalino. São também pozolanas naturais certos materiais de origem fóssil, tais como os diatomitos.

As pozolanas artificiais são argilas de qualquer tipo depois de sujeitas a temperaturas suficientes para a desidratação, mas inferiores ao início da fusão.

Os subprodutos industriais que são mais correntemente utilizados como adição de materiais cimentícios são as cinzas volantes e a sílica de fumo.

As cinzas volantes são o resíduo finamente dividido da queima do carvão pulverizado ou moído, que é arrastado nos gases de combustão.

A sílica de fumo é um subproduto resultante da preparação do silício ou de ligas de silício, especialmente de ferro-silício, em fornos eléctricos de arco, onde o quartzo é reduzido pelo carvão, a elevadas temperaturas.

As vantagens da utilização das pozolanas como adição a materiais cimentícios são, de natureza técnica e de natureza económica.

Sob o ponto de vista técnico, por um lado, as pozolanas diminuem a concentração em hidróxido de cálcio da solução de contacto com os componentes hidratados do cimento portland. Os silicatos e aluminatos que se formam são menos básicos do que os do cimento, com um pH de equilíbrio de cerca de 11, o que impede as reacções expansivas do sulfato com os aluminatos, quer do cimento quer do

agregado, e dos álcalis do cimento com a sílica, silicatos ou carbonatos do agregado. Por outro lado, uma boa pozolana, usada com teores apropriados, contribui mais para o abaixamento do calor de hidratação do cimento do que para o abaixamento da sua tensão de rotura, o que torna o betão com pozolana bastante vantajoso na construção de grandes massas de betão (Coutinho, 1988).

Sob o ponto de vista económico a vantagem reside no seu baixo custo. As pozolanas mais importantes sob este aspecto são os subprodutos industriais, como as cinzas volantes. Antigamente, a sílica de fumo era também um produto barato, no entanto como actualmente a sua produção não é tão grande como a procura este subproduto tornou-se caro.

Não se pode esquecer que, relativamente à corrosão das armaduras, o hidróxido de cálcio tem uma acção benéfica: ao originar um ambiente de elevada alcalinidade, é responsável pela formação de uma camada de óxido que envolve as armaduras (película passiva) e as protege contra a corrosão; a presença de elevada quantidade de hidróxido de cálcio tem um efeito retardador na progressão da carbonatação no betão; e a um aumento do teor em hidróxido de cálcio corresponde um aumento do teor crítico de cloretos (Teles, 2007).

As cinzas volantes são o resíduo, finamente dividido, da combustão do carvão pulverizado ou moído, que é arrastado nos gases da combustão. A sua captação é feita por colectores mecânicos, que recolhem as partículas de maior dimensão, por precipitadores electrostáticos, que captam as partículas menores, ou ainda por filtros de saco.

A natureza pozolânica deste material parece ter sido identificada pela primeira vez nos Estados Unidos da América, em 1914. Porém, o seu uso no betão só começou a desenvolver-se por volta de 1930, com os trabalhos publicados pela Electric Illuminating Company e pela Detroit Edison Company, a que se seguiu, em 1937, o estudo fundamental realizado por Davis e outros. A utilização de cinzas volantes na construção da barragem de Hungry Horse, nos E.U.A., em 1948, veio dar o impulso definitivo na sua aplicação no fabrico de betões (Coutinho, 1988).

Inicialmente, as cinzas volantes foram usadas apenas como uma substituição parcial de cimento, com o objectivo de tornar este material, fundamental na composição do betão, mais barato. À medida que a sua utilização se foi generalizando, foram-se evidenciando as vantagens do emprego deste componente, tendo-se verificado a sua influência em certas propriedades do betão, como, por exemplo, o aumento da trabalhabilidade, a redução do calor de hidratação, a diminuição da permeabilidade e a consequente melhoria da durabilidade.

Devido à grave crise do petróleo, ocorrida nos anos 60 e 70, foi implementada nos E.U.A. a construção de novas centrais termoelectricas, dotadas de tecnologia apurada, traduzida numa substancial eficiência da queima. Assim, estas modernas instalações industriais passaram a gerar cinzas volantes com menor teor de carbono e maior finura do que as produzidas até então. Em paralelo, com a maior disponibilidade deste material, foram desenvolvidos trabalhos de investigação um pouco por todo o mundo, o que permitiu um maior conhecimento das reacções químicas ocorridas em betões com cinzas volantes e um apreciável desenvolvimento da tecnologia deste tipo de betões. Hoje em dia, a aplicação de cinzas volantes é justificada por várias razões, sendo de destacar além da redução de custos, a melhoria de propriedades, quer do betão fresco, quer do betão endurecido.

Devido à escassez de elementos actuais referentes a Portugal, a título de exemplo, apresenta-se a situação nos E.U.A. Anualmente, milhões de toneladas de cinzas volantes são produzidas, sendo mais de 35% reutilizadas em diversas aplicações e as restantes colocadas em aterros. A maioria das cinzas reutilizadas, vão para o sector da construção, incluindo a produção de cimento e betão, estabilização

de solos, estabilização de aterros de resíduos, misturas para *grouts* e como filler mineral em pavimentações de asfalto (USEPA, 2007).

A nível mundial, a estimativa da produção de cinzas de carvão foi de 562 milhões de toneladas em 1989, sendo reaproveitadas cerca de 90 milhões (16%). O total consumido em betão foi de aproximadamente 27,9 milhões de toneladas (cerca de 5% do total da produção e 31% das reutilizadas). Estimativas relativas à produção de cinzas em 2000 indicam a subida para valores de cerca de 661 milhões de toneladas, contribuindo a China e a Índia com quantidades superiores a 100 milhões cada (Malhotra, 1999).

Apesar dos progressos realizados na produção das cinzas volantes, existem alguns desafios pela frente. Em 1990, as centrais eléctricas dos E.U.A. foram obrigadas a reduzir as emissões dos óxidos de azoto (NO_x), o que levantou alguns problemas para a utilização das cinzas volantes no betão pronto, o maior mercado para as cinzas. As centrais térmicas recorrem à restrição de oxigénio durante a combustão para diminuir as emissões de NO_x , o que provoca a permanência de carbono inqueimado nas cinzas, inviabilizando a sua utilização no betão, caso não sejam tratadas. Outro sistema para remover as emissões de óxidos de azoto utiliza um processo catalítico que pode deixar resíduos de amónio nas cinzas. Apesar de esta situação não afectar o comportamento das cinzas volantes no betão, os vapores libertados pelo amónio durante a amassadura podem criar condições de trabalho nocivas.

Diversas empresas têm investigado e comercializado tecnologias e processos industriais com vista a melhorar as propriedades das cinzas volantes. Algumas desenvolveram processos para separar fisicamente o carbono das cinzas, enquanto que outras queimam o carbono e qualquer amónio residual. Ao mesmo tempo, a indústria tem desenvolvido novos aditivos que contrariam os efeitos do carbono e amónio (USEPA, 2007).

Neste capítulo sistematiza-se o estado da arte sobre a aplicação de cinzas volantes nos materiais cimentícios. A literatura especializada apresenta uma vasta informação sobre o comportamento das cinzas volantes no betão, no entanto, o mesmo não acontece em relação às argamassas. No entanto, pensa-se que os comportamentos, aqui descritos e não directamente relacionados com a presença de agregado grosso, se podem também aplicar às argamassas.

2.2. TIPOS E CARACTERÍSTICAS DE CINZAS VOLANTES

2.2.1. TIPOS DE CINZAS VOLANTES

A norma portuguesa e europeia NP EN 450-1 (2006), caracteriza as cinzas volantes como um pó fino constituído principalmente por partículas vítreas de forma esférica, resultante da queima de carvão pulverizado, com ou sem materiais de co-combustão, que têm propriedades pozolânicas e são constituídas essencialmente por SiO_2 e Al_2O_3 , sendo no mínimo 25% em massa o teor de SiO_2 reactivo. As cinzas volantes são obtidas por precipitação electrostática ou mecânica das poeiras arrastadas dos gases de combustão da queima de carvão pulverizado em caldeiras, com ou sem materiais de co-combustão.

A norma americana ASTM C618 (1998) agrupa as cinzas volantes em duas classes, conforme o tipo de carvão utilizado. As cinzas volantes produzidas a partir de antracites ou carvões betuminosos são da classe F, enquanto que as da classe C são resultantes da queima de lenhites e carvões sub-betuminosos.

As cinzas da classe F, de baixo teor de cálcio, apresentam quantidades de CaO inferiores a 6% e possuem propriedades pozolânicas, mas não aglomerantes e hidráulicas. Estas cinzas geralmente contêm mais de 3% de carbono inqueimado, determinado pelo teste de perda ao fogo.

As cinzas da classe C, de elevado teor de cálcio, contêm geralmente mais de 15% de CaO. Este tipo de cinzas para além de possuir propriedades pozolânicas, apresenta também propriedades hidráulicas. Na generalidade dos casos, estas cinzas revelam um endurecimento inicial relativamente rápido quando reagem com a água, à semelhança do cimento portland. O teor de carbono inqueimado é geralmente inferior a 1%.

Segundo Joshi e Lohtia (1995), a classificação proposta pela ASTM, baseada apenas no tipo de carvão queimado, não revela realismo nem racionalidade na previsão do comportamento das cinzas volantes quando incorporadas em betões. Cinzas de baixo teor de cálcio (classe F) podem ser obtidas a partir de carvões não betuminosos e carvões betuminosos podem produzir cinzas não pertencentes à classe F.

A grande maioria das cinzas volantes produzidas em todo o mundo pertence à classe F e, normalmente, contêm reduzidas quantidades de cálcio. Apenas recentemente apareceram no mercado as cinzas de elevado teor de cálcio, nos E.U.A., Canadá, Polónia e Grécia (Malhotra, 1993, 1999).

A norma portuguesa e europeia apenas permite a utilização da classe F, nas cinzas volantes para o betão.

2.2.2. CARACTERÍSTICAS DAS CINZAS VOLANTES

2.2.2.1. Considerações gerais

Uma utilização efectiva das cinzas volantes no betão requer um conhecimento adequado das suas características, nomeadamente, propriedades físicas, químicas e mineralógicas.

As partículas de carvão são queimadas a elevadas temperaturas e os compostos minerais inorgânicos transformados em cinzas. Cerca de 95% da matéria mineral presente no carvão é constituída por argilas, pirite e carbonatos (calcite, dolomite, aragonite), podendo conter algumas micas, embora a maior parte, devido às elevadas temperaturas, já se encontre argilizada.

Durante a combustão, estas partículas minerais são submetidas a alterações químicas e físicas, na presença de ar em excesso e a elevadas temperaturas. As pirites transformam-se em óxidos de ferro, enquanto que as partículas de argila e escórias de mica vitrificam parcialmente, formando esferas de silicatos complexos (alumino silicatos amorfos). A calcinação dos carbonatos origina óxido de cálcio e de magnésio (CaO; MgO), hidróxido de cálcio e de magnésio [$\text{Ca}(\text{HO})_2$; $\text{Mg}(\text{HO})_2$] e dióxido de carbono (CO_2). A mistura de partículas de argila e de carbonatos com matéria gasosa produz silicato de cálcio (CaSiO_2) e aluminato de cálcio (CaAl_2O_3) ou sulfato de cálcio (CaSO_4) (Joshi, 1981).

As propriedades físicas e a sua composição química dependem de diversos factores, tais como o grau de pulverização do carvão, a temperatura da chama no forno, as condições de oxidação, a taxa de arrefecimento dos resíduos da combustão e do sistema de recolha e armazenagem das cinzas (Joshi e Lohtia, 1995).

2.2.2.2. Propriedades físicas

As cinzas volantes são constituídas essencialmente por partículas de forma esférica, que podem ser maciças ou ocas (cenosferas). A sua superfície apresenta-se lisa, rugosa ou porosa. Na Figura 2.1 apresentam-se diferentes aspectos de cinzas volantes, com superfície lisa ou porosa, quando observadas ao microscópio electrónico de varrimento (MEV). Estas partículas, nem todas da mesma natureza, são constituídas por silício e alumínio e maiores ou menores teores de ferro, magnésio, titânio, enxofre, sódio e potássio.

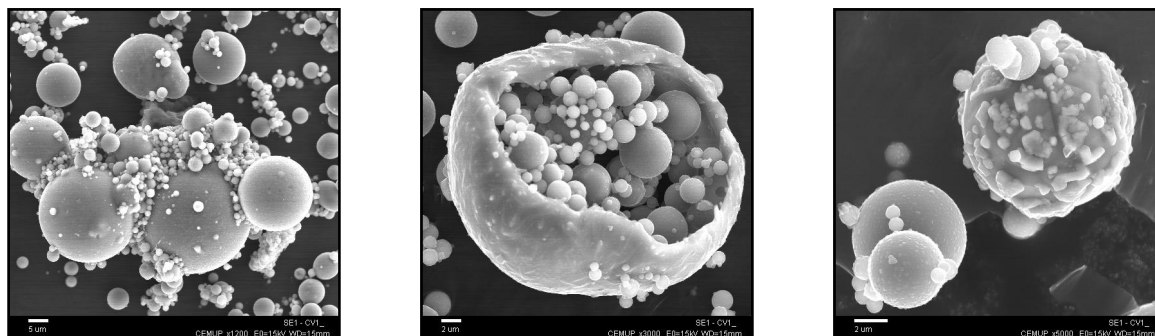


Figura 2.1 – Diferentes aspectos de cinzas volantes (Teles, 2002).

Na Figura 2.2 mostra-se uma cinza volante de superfície porosa, também observada por MEV. Estas partículas são muito ricas em carbono.

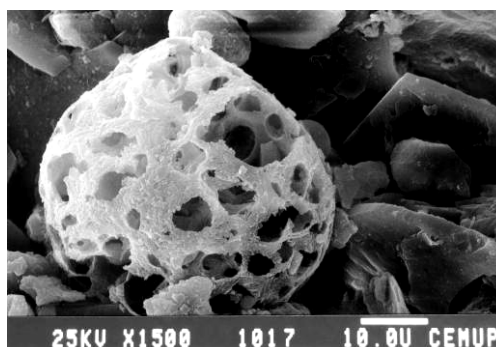


Figura 2.2 – Cinza volante de superfície porosa (Begonha, 2001).

Para que as cinzas volantes apresentem propriedades pozolânicas é essencial que a sua estrutura física seja amorfa. A fracção vítrea das cinzas volantes varia usualmente entre 60% e 90%, dependendo do tipo de carvão e seu grau de pulverização, temperatura da chama no forno e taxa de arrefecimento dos resíduos da combustão (Coutinho, 1988; Joshi e Lohtia, 1995).

O diâmetro das cinzas volantes varia de menos de 1 μm a cerca de 100 μm (Neville, 1995), sendo o diâmetro médio de cerca de 10 μm (Coutinho, 1988). Segundo Joshi e Lohtia, (1995), a grande maioria das partículas apresenta diâmetros inferiores a 3 μm e, nas cinzas betuminosas, as partículas têm um diâmetro compreendido entre menos de 1 μm e 150 μm , com o diâmetro médio de cerca de 7 μm a 12 μm .

A variação no tamanho das cinzas depende do tipo de equipamento utilizado na recolha. Em instalações antigas, onde a recolha é feita através de colectores mecânicos, a dimensão das cinzas é superior à das provenientes de centrais mais modernas, que utilizam precipitadores electrostáticos ou filtros de mangas (Camões, 2002).

As partículas com dimensões superiores a 125 μm são muito porosas e a sua ocorrência está associada a grandes quantidades de carbono (Alonso e Wesche, 1991).

Na Figura 2.3 mostra-se a medição de alguns diâmetros nas cinzas usadas no presente trabalho.

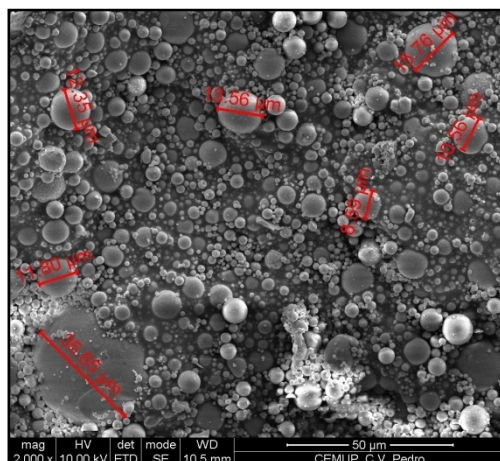


Figura 2.3 – Diâmetros de cinzas volantes.

A finura das cinzas pode ser avaliada recorrendo a diferentes métodos, sendo o mais corrente, devido à facilidade de execução, a determinação da quantidade de partículas retidas no peneiro de abertura de 45 μm . A medição da superfície específica é também muito usada para quantificar a finura das cinzas.

A superfície específica pode ser determinada por diversos métodos, o que conduz a diferentes resultados. O processo mais corrente é o de Blaine, um método de medição baseado na permeabilidade ao ar de uma camada de partículas (Coutinho, 1988). Contudo, Neville (1995) refere que a superfície específica de pós muito mais finos do que o cimento tais como as cinzas volantes e a sílica de fumo, não pode ser determinada por este método, mas requer a utilização de métodos de adsorção de gás, sendo o mais conhecido o da adsorção de nitrogénio (B.E.T.), (Brunauer *et al.*, 1938) que, no entanto, é pouco usado dada a sua morosidade. Este método conduz a valores substancialmente superiores, uma vez que fornece uma medida absoluta da superfície específica.

Este facto explica a aparente incoerência entre os valores da superfície específica medidos pelo método de Blaine e por adsorção de nitrogénio (B.E.T.), apresentados por Joshi e Marsh (1987), no Quadro 2.1, para cinzas volantes provenientes do Canadá, que mostram que, além de os valores medidos pelo método B.E.T. serem, como referido, muito superiores aos de Blaine, a relação entre os valores obtidos pelos dois métodos variar entre cerca de 1,8 e 30,5.

Quadro 2.1 – Propriedades físicas de 14 cinzas volantes provenientes do Canadá (Joshi e Marsh, 1987).

Cinza volante	Tipo carvão	Origem	Massa volúmica (kg/m ³)	% retida no peneiro 45 µm	Superfície específica (m ² /kg)	
					Blaine	B.E.T.
1	sub-betuminoso	<i>Alberta</i>	2190	32,0	420	1520
2	sub-betuminoso	<i>Alberta</i>	1920	26,0	460	1610
3	sub-betuminoso	<i>Alberta</i>	1910	22,0	430	1610
4	sub-betuminoso	<i>Alberta</i>	2030	9,8	590	1640
5	lenhite	<i>Saskatchewan</i>	2540	2,8	500	1140
6	sub-betuminoso	<i>Saskatchewan</i>	2150	20,4	220	6700
7	lenhite	<i>Saskatchewan</i>	2370	44,8	170	1010
8	lenhite	<i>Saskatchewan</i>	2390	26,6	220	3470
9	betuminoso	<i>Ontario</i>	2460	24,0	280	550
10	betuminoso	<i>Ontario</i>	2310	27,0	250	3280
11	betuminoso	<i>New Brunswick</i>	2940	21,4	310	2680
12	betuminoso	<i>New Brunswick</i>	2870	26,4	180	430
13	betuminoso	<i>Nova Scotia</i>	2530	28,2	360	850
14	sub-betuminoso	<i>Nova Scotia</i>	2440	34,4	380	670

A superfície específica também pode ser determinada com recurso à análise da curva granulométrica, que é, em geral, correntemente efectuada através de difracção laser. Os valores obtidos por este método são cerca de 70% inferiores aos de Blaine devido ao facto de nem todas as partículas serem esféricas.

No entanto, valores apresentados por Cabrera e Gray (1973) para medições da superfície específica com recurso à análise da curva granulométrica, por difracção laser mostram, ter diferenças em relação aos medidos pelo método de Blaine, substancialmente superiores a 70%.

A superfície específica, medida pelo método de Blaine varia, em geral, de 250 m²/kg a 550 m²/kg (Alonso e Wesche, 1991).

Begonha (2001) refere que as cinzas volantes porosas de natureza carbonosa e elevadíssima superfície específica são em média de dimensões superiores às de superfície lisa ou um pouco rugosa, que, apesar de não apresentarem todas a mesma composição, são maioritariamente constituídas por sílica e alumínio, variando o seu diâmetro entre alguns µm e 68 µm.

Alonso e Wesche (1991) mencionam que as partículas com dimensões superiores a 125 µm são dotadas de elevada porosidade e onde as partículas de carbono mais se concentram, concluindo que o carbono inqueimado é responsável pelo elevado valor da superfície específica, porque origina cinzas volantes muito porosas.

Para Jalali (1991), ao contrário de Alonso e Wesche (1991), a elevada superfície específica das cinzas volantes é provocada, fundamentalmente, pela contribuição da fracção fina, baseado no facto de as partículas de menor dimensão apresentarem maior superfície específica.

Apesar de não haver acordo quanto à forma mais eficaz de determinar a finura das cinzas volantes, é consensual que maiores finuras conduzem a maior actividade pozolânica, uma vez que se

trata de reacções químicas, com um dos reagentes (cinzas volantes) no estado sólido, ocorrendo mais rapidamente com o aumento da finura das partículas sólidas, isto é da área disponível para reacção.

A massa volúmica pode ser determinada, recorrendo ao processo usual utilizado para o cimento, através do voluminímetro de Le Chatelier, descrito em LNEC E 64 (1979). Tal como o verificado para outras propriedades físicas, a massa volúmica das cinzas volantes pode variar significativamente. (Malhotra e Ramezaniapour, 1994), apresentando valores entre 1900 kg/m³ e 2960 kg/m³. Neville (1995) refere 2350 kg/m³, como valor típico desta propriedade

Estes valores estão de acordo com os apresentados por Joshi e Marsh (1987), no quadro anterior e com valores de Cabaço (1988), para cinzas volantes portuguesas das centrais de Sines, e de Rocha (1999) para a central do Pego (Quadro 2.2).

Quadro 2.2 - Propriedades físicas de cinzas volantes portuguesas (Cabaço, 1988; Rocha, 1999).

Central	Tipo de Carvão	Massa volúmica (kg/m ³)	Finura (% retida no peneiro 45 µm)	Superfície específica Blaine (m ² /kg)
			peneiração seca	
Sines	betuminoso	2200 a 2300	24	292 a 310
Pego	betuminoso	2360	14,1 a 31,6	387,9

2.2.2.3. Propriedades químicas

A composição química das partículas depende significativamente do tipo de carvão, sendo constituídas principalmente por sílcio e alumínio, contendo ainda, maiores ou menores quantidades, principalmente de ferro, magnésio, cálcio, álcalis (sódio e potássio) e titânio.

As análises químicas das cinzas volantes, em termos de óxidos elementares, incluem a sílica (SiO₂), a alumina (Al₂O₃), o óxido de cálcio (CaO), o óxido de ferro (Fe₂O₃), o óxido de magnésio (MgO), o óxido de titânio (TiO₂), o óxido de enxofre (SO₃), o óxido de sódio (Na₂O) e o óxido de potássio (K₂O). O carbono inqueimado é outro dos constituintes presentes em todas as cinzas volantes, avaliado pelo ensaio da perda ao fogo. A sílica e a alumina perfazem, conjuntamente, cerca de 60% a 75% do total.

O carbono presente nas cinzas volantes é resultado da combustão incompleta do carvão e dos aditivos orgânicos utilizados no processo da sua recolha. O teor de carbono não é quantificado directamente, mas sim recorrendo à determinação do teor em inqueimados (perda ao fogo). O teor de inqueimados inclui, além do carbono livre, perdas de água combinada e dióxido de carbono provenientes dos hidratos e dos carbonatos presentes nas cinzas volantes, sendo assumido, sem se cometer um grande erro, como aproximadamente igual ao conteúdo de carbono.

As cinzas volantes provenientes de carvão sub-betuminoso e de lenhite apresentam uma proporção relativamente mais elevada de CaO e MgO e uma menor proporção de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃, quando comparadas com as cinzas oriundas de carvões betuminosos. Os carvões betuminosos produzem cinzas volantes com quantidades relativamente mais elevadas de carbono inqueimado do que os carvões sub-betuminosos ou lenhites. A quantidade de carbono inqueimado depende ainda, até certo ponto, do grau de pulverização do carvão, taxa de combustão e razão ar/combustível, para além do tipo e proveniência do carvão (Joshi e Lohtia, 1995).

No Quadro 2.3 são apresentados valores de propriedades químicas das cinzas volantes referidas no Quadro 2.1, segundo estudo realizado por Joshi e Marsh, 1987.

Quadro 2.3 – Composição química de 14 cinzas volantes provenientes do Canadá (Joshi e Marsh, 1987).

Cinza volante	% do peso									Perda ao fogo (%)
	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	
1	22,3	4,1	1,01	13,6	1,58	0,2	0,27	1,02	54,8	0,26
2	23,1	3,7	0,78	13,0	1,17	0,2	2,19	1,26	57,6	0,15
3	21,0	3,5	0,50	11,6	0,71	≤0,1	1,68	1,51	56,4	0,61
4	22,7	3,7	0,60	8,4	0,75	≤0,1	2,36	1,02	57,4	0,10
5	23,7	4,4	0,94	19,2	3,96	0,6	0,54	2,41	57,9	0,13
6	20,4	5,4	0,60	12,2	1,38	0,1	0,84	1,93	52,6	0,12
7	20,8	4,1	0,97	20,0	3,13	0,2	5,66	1,14	40,7	0,83
8	20,8	3,8	0,87	18,6	2,42	≤0,1	5,80	1,45	38,1	0,34
9	22,7	16,5	1,01	4,6	0,64	0,5	0,54	2,0	44,6	5,9
10	21,2	7,1	0,81	6,6	0,88	0,1	0,4	1,14	51,9	5,3
11	13,6	38,5	0,51	1,81	0,14	0,6	0,11	1,93	34,9	0,11
12	13,6	42,2	0,56	1,22	0,06	0,4	0,09	1,26	31,7	2,0
13	20,8	24,4	0,76	0,94	0,12	0,6	0,34	1,63	46,7	0,53
14	18,0	19,2	0,74	0,76	0,75	0,99	0,39	2,93	44,7	6,25

No Quadro 2.4 mostram-se valores de propriedades químicas de cinzas volantes portuguesas.

Quadro 2.4 – Propriedades químicas de cinzas volantes portuguesas (Cabaço, 1988; Rocha, 1999).

Central	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Perda ao fogo
	mínimo								
	máximo								
Sines	50%	27%	5%	1,5%	0,5%	0,5%	1%	0,5%	2%
	54%	29%	8%	4%	2%	1%	2%	1%	4%
Pego	42,2%	21%	3,5%	1,7%	0,6%	0,2%	1,1%	0,2%	5,6%
	58,5%	32,6%	9,1%	9,2%	2,6%	0,9%	3,1%	1,04%	9,3%

A reacção de hidratação das cinzas, conjuntamente com o cimento, depende de diferentes parâmetros como, a composição química dos materiais cimentícios, a distribuição dos tamanhos das partículas e sua forma, a reactividade e a estrutura física.

De um modo geral, pode afirmar-se que os compostos siliciosos e aluminosos das cinzas volantes reagem com o hidróxido de cálcio do cimento para formarem silicatos e aluminatos de cálcio, da família dos que se encontram entre os produtos da hidratação do cimento portland. Efectivamente, os principais compostos cuja existência se tem observado são o silicoaluminato bicálcico hidratado, os silicatos de cálcio hidratados e os aluminatos de cálcio hidratados (Coutinho, 1988).

Mas as cinzas não reagem só com o hidróxido de cálcio, sendo notável a sua acção sobre o silicato bicálcico do cimento, acelerando extraordinariamente a sua hidratação e o endurecimento consequente. Também, reagem com o aluminato tricálcico ou com os produtos da sua hidratação (Mazzara e Costa (1979)).

Como a reacção se dá entre as cinzas, que se encontram no estado sólido, e o hidróxido de cálcio, em solução, portanto com um dos reagentes no estado sólido, a área superficial do sólido em contacto com a solução deve ser a maior possível. Assim, é habitual que a superfície específica das cinzas volantes atinja valores duplos ou triplos das do cimento.

Para que haja reactividade pozolânica, isto é, capacidade de o material designado por pozolana se combinar com o hidróxido de cálcio, é necessário que a sílica e a alumina não tenham um elevado grau de cristalinidade.

Segundo Alonso e Wesche (1991), cinzas com conteúdos de SiO_2 inferiores a 35% são praticamente inactivas como pozolanas e a sua incorporação no betão não é aconselhada. Contrariamente, Halstead (1986); Mehta (1985); e Joshi e Lohtia (1997) consideram que em termos de composição química, com excepção do teor em cálcio, a variação dos constituintes das cinzas volantes influencia, aparentemente, de forma marginal as suas propriedades pozolânicas ou cimentícias.

As cinzas volantes com elevado teor em cálcio, ASTM, classe C, dotadas de propriedades aglomerantes e hidráulicas, são muito mais reactivas do que as da classe F (Neville, 1995), no entanto, Alonso e Wesche (1991), referem que sua inclusão em betões deve ser evitada, provavelmente por poderem conter óxido de cálcio cristalino que origina, a longo prazo, reacções expansivas no betão.

Cinzas volantes com elevado teor de cálcio (ASTM, classe C) apresentam perda ao fogo, em geral, inferior a 1%, enquanto que as da classe F podem atingir valores até cerca de 20%.

A contribuição da quantidade de carbono presente nas cinzas é decisiva na exigência de água de pastas, argamassas e betões. O total de água necessário à obtenção de uma pasta de consistência normal é tanto maior quanto maior for o teor em carbono, uma vez que, como referido, as partículas, ricas em carbono apresentam porosidade elevada e grande superfície específica, absorvendo, por isso, quantidades significativas não só de água, como de adjuvantes incluídos na amassadura do betão, nomeadamente, superplastificantes, agentes introdutores de ar ou retardadores de presa.

Segundo Alonso e Wesche (1991), em geral, quanto menor for o teor de carbono melhor será a cinza volante para aplicação em argamassas e betões.

2.2.2.4. Imposições normativas

As várias normas existentes relativas a cinzas volantes revelam uma falta de uniformidade na identificação das características físicas e químicas e ainda, preconizam diferentes limites para determinado requisito.

Para Swamy (1993), devido à íntima relação entre as características a exigir aos materiais e o seu comportamento estrutural, é inevitável que, uma vez que o desempenho das adições no betão ainda não está integralmente caracterizado, nas normas, algumas especificações sejam demasiadamente conservadoras.

De modo a contrariar esta situação, as normas vigentes deviam ser substituídas por outras, baseadas em critérios de desempenho, permitindo uma maior dosagem da utilização de adições e ajudando a estabelecer critérios que esclareçam e viabilizem a possibilidade de realização de composições de betão, com uma ou mais adições ao cimento (Malhotra, 1993 e 1999).

Para Malhotra (1999) e ACI (1996) as características mais importantes a exigir às cinzas volantes, quando utilizadas conjuntamente com o cimento em betões, são a finura e o teor de inqueimados.

Um valor elevado do teor de inqueimados pode criar problemas relacionados com a durabilidade dos betões em ambientes frios, com possibilidade de formação de gelo, podendo originar dificuldades no controlo e manutenção do teor de ar adequado (Camões, 2002).

Swamy (1993) considera como principais características a avaliar em subprodutos siliciosos, a perda ao fogo e a humidade. O controlo da humidade assegura um correcto manuseamento do produto e evita possíveis reacções de hidratação, em particular nas cinzas da classe C, dotadas de características hidráulicas.

As cinzas volante afectam a cor do betão, uma vez que estas são tanto mais escuras, quanto maior é o teor em carbono. As mudanças na cor de betões com cinzas volantes devem ser convenientemente averiguadas uma vez que podem trazer limitações sob o ponto de vista estético, particularmente se betões com e sem cinzas forem colocados lado a lado (Neville, 1995).

Para diversos investigadores (Aïtcin, 1998; Malhotra, 1999), é consensual que nem todas as cinzas volantes disponíveis no mercado são adequadas para o seu uso em betões. Porém, é possível intervir nas cinzas, melhorando determinadas características. Técnicas de separação, suspensão e moagem, podem beneficiar o desempenho das cinzas, transformando cinzas não conformes em cinzas aptas para aplicação em betão.

Na norma portuguesa e europeia NP EN 450-1 (2006) são descritas as definições, especificações e critérios de conformidade das cinzas volantes para betão.

No Quadro 2.5 são apresentadas as principais exigências da norma portuguesa e europeia e comparadas como as da norma americana ASTM C618 (1998), sendo no entanto de referir que a norma portuguesa e europeia, apenas permite o uso de cinzas da classe F, ASTM. Constatou-se que a norma portuguesa é, de uma maneira geral, muito mais restritiva do que a americana.

Quadro 2.5 – Requisitos químicos e físicos a exigir às cinzas volantes.

Requisito		EN 450-1	ASTM C618	
			Classe F	Classe C
SiO ₂ reactivo (%)	mín.	25	—	—
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%)	mín.	70	70	50
SO ₃ (%)	máx.	3,0	5,0	—
MgO (%)	máx.	4,0	—	—
CaO livre (%)	máx.	2,5 ^(I)	—	—
CaO reactivo (%)	máx.	10,0	—	—
Perda ao fogo (%)	máx.	9,0 ^(II)	6,0 ^(III)	6,0
Humidade (%)	máx.	—	3,0	—
Na ₂ O (%)	máx.	5,0	1,5 ^(IV)	—
Cloretos (%)	máx.	0,10	—	—
P ₂ O ₅ (mg/kg)	máx.	100	—	—
Retidos: 45 µm (%)	máx.	40 ^(V)	34	—
Índice de actividade (%)	mín.	75 (28 dias)	75 (7 dias)	—
		85 (90 dias)	75 (28 dias)	—
Expansibilidade (mm)	máx.	10 ^(VI)	—	—
Expansão/contracção em autoclave (%)	máx.	—	0,8	—
Exigência de água (%)	máx.	95 ^(VII)	105	—
Tempo de início de presa (min)	máx.	t _c + 120 ^(VIII)	—	—

(I) Se o teor de óxido de cálcio livre é superior a 1,0% em massa, as cinzas volantes devem ser ensaiadas para verificar a conformidade com os requisitos de expansibilidade.

(II) Existem 3 categorias, cujos limites devem ser cumpridos:

Categoria A: perda ao fogo inferior a 5,0% em massa;

Categoria B: perda ao fogo entre 2,0% e 7,0% em massa;

Categoria C: perda ao fogo entre 4,0% e 9,0% em massa;

(III) Pode atingir 12,0% desde que existam dados que comprovem o seu desempenho;

(IV) Opcional, apenas se requerido pelo comprador;

(V) Existem 2 categorias, com os seguintes limites:

Categoria N: a finura não deve exceder 40% em massa e não deve variar mais de ±10 pontos percentuais em relação ao valor declarado;

Categoria S: a finura não deve exceder 12% em massa. Não é aplicável a variação de ±10 pontos percentuais.

(VI) Se o teor de óxido de cálcio livre for inferior a 1,0% em massa, considera-se que a cinza volante cumpre este requisito.

(VII) Referente às cinzas volantes com finura da categoria S. Para as cinzas volantes da categoria N, este requisito não se aplica.

(VIII) t_c representa o tempo de início de presa de uma pasta de cimento constituída por 100% de cimento de referência.

2.2.3. INFLUÊNCIA DAS CINZAS VOLANTES NAS PROPRIEDADES DO BETÃO

2.2.3.1. Considerações gerais

As cinzas volantes podem ser usadas no betão, como substituto parcial do cimento, como correcção da granulometria do agregado fino ou simultaneamente com as duas funções. A primeira aplicação é a mais importante por permitir a economia do cimento e é esta utilização que vai ser de seguida analisada.

Com base nos conhecimentos actuais sobre a influência da utilização de cinzas volantes nas propriedades do betão, tanto no estado fresco como endurecido, faz-se a descrição dos principais efeitos que as cinzas têm nas propriedades mais relevantes do betão.

2.2.3.2. Betão fresco

A utilização de cinzas volantes como substituto de parte do cimento influencia a quantidade de água de amassadura e a trabalhabilidade. Para uma trabalhabilidade constante, a redução da quantidade de água no betão devido à incorporação de cinzas volantes está compreendida, geralmente, entre 5% e 15%, quando comparada com um betão de referência com a mesma quantidade de ligante mas apenas contendo cimento portland. A redução é mais notória nas razões água/ligante mais elevadas (CUR, 1991).

Neville (1995) considera que o efeito das cinzas volantes na trabalhabilidade é devido, essencialmente, à dispersão e adsorção das partículas das cinzas nas do cimento. Este efeito redutor de água é explicado, pelo mesmo autor, pela natureza esférica das partículas das cinzas, que actuam como lubrificante, é o chamado “*ball-bearing effect*”.

Helmuth (1987), além do mecanismo de adsorção das partículas, referido anteriormente, considera a desfloculação das partículas de cimento. Em consequência da elevada superfície específica das partículas de menores dimensões das cinzas, estas ficam adsorvidas na superfície das partículas de cimento. Se o número de cinzas mais finas for suficiente para cobrir a superfície do cimento, estas ficam desfloculadas e a quantidade de água requerida para uma dada consistência é reduzida.

Uma quantidade de cinzas volantes que exceda o estritamente necessário para cobrir a superfície das partículas de cimento não traz qualquer vantagem adicional do ponto de vista da quantidade de água. De facto, a redução da quantidade de água apenas aumenta até um conteúdo de cinzas de cerca de 20% (Helmuth, 1987). Estes valores estão de acordo com as investigações de Berg e Kukko (1991), que referem que não se verificam diferenças significativas na trabalhabilidade para percentagem de substituição em argamassas entre os 20% e os 70%.

A presença de quantidades elevadas de carbono nas cinzas volantes afecta adversamente a trabalhabilidade. Uma variação do teor em carbono pode conduzir, ainda, a um comportamento errático no que diz respeito aos adjuvantes introdutórios de ar, que podem ficar adsorvidos nas partículas porosas de carbono (Neville, 1995). Experimentalmente, verifica-se a necessidade de aumentar a quantidade destes produtos para obter um determinado nível de ar incluído em betões com cinzas volantes (Camões, 2002).

A utilização de cinzas volantes como substituto de parte do cimento também provoca um atraso na presa do cimento. Segundo Malhotra e Ramezaniapour (1994), existem diversas razões que explicam o efeito que as cinzas têm na presa do cimento, nomeadamente: as cinzas volantes podem estar dotadas de características cimentícias (classe C); os sulfatos pertencentes às cinzas podem reagir com o cimento da mesma forma que o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) adicionado no fabrico do cimento, provocando um atraso na presa; como resultado da presença de cinzas a pasta de ligante pode conter uma menor quantidade de água e influenciar a velocidade de hidratação; as cinzas volantes podem absorver importantes quantidades de adjuvantes introduzidos no betão com a finalidade de alterar alguma ou algumas das suas propriedades, influenciando assim as condições de hidratação da pasta de ligante.

Para Neville (1995) o uso de cinzas volantes tem um efeito retardador de presa que, normalmente, é de cerca de uma hora e é provavelmente devido à libertação do SO_3^{2-} , presente na superfície das partículas das cinzas. Apenas o tempo de presa inicial é retardado, mantendo-se constante o período de tempo entre o início e o fim de presa. Esta acção retardadora pode ser benéfica, por exemplo, em tempo quente, caso contrário poderá ser necessário utilizar um adjuvante acelerador de presa.

A hidratação do cimento Portland é uma reacção exotérmica acompanhada pela libertação de calor, o que conduz a um aumento da temperatura do betão fresco. Em betão em massa, dependendo da quantidade de cimento, volume de betão, tipo de cofragem e condições ambientais (temperatura e humidade relativa), as temperaturas do betão podem aumentar cerca de 20°C a 50°C, entre 2 a 5 dias após a colocação do betão. Ao arrefecer, o betão pode fissurar devido à solicitação térmica. A incorporação de cinzas volantes de baixo teor de cálcio reduz o calor de hidratação. Estudos realizados por Berry e Malhotra (1982), utilizando 30% de substituição do cimento por cinzas volantes de baixo teor de cálcio e comparando com o betão sem substituição, mostraram uma diminuição da temperatura do betão de 47°C para 33°C, 4 dias após a colocação do betão. A substituição de 40% a 75% do cimento por cinzas volantes oferece uma vantagem óbvia na mitigação ou mesmo eliminação das tensões térmicas induzidas durante o endurecimento do betão em secções de grandes dimensões (Joshi e Lohtia, 1995).

Uma das vantagens técnicas apontada à utilização de cinzas volantes no betão é o facto de uma boa pozolana, usada com teores apropriados, contribui mais para o abaixamento do calor de hidratação do cimento do que para o abaixamento da sua tensão de rotura, o que torna o betão com pozolana bastante vantajoso na construção de grandes massas de betão (Coutinho, 1988).

As cinzas volantes tornam a mistura de betão mais coesa e adequada para bombagem, facilitando as operações de acabamento. A redução da exsudação, propriedade que pode contribuir de forma importante para a redução ou eliminação da retracção de presa e segregação do betão, é também referida por diversos autores (Coutinho, 1988; Neville, 1995; Taylor, 1998).

2.2.3.3. Betão endurecido

As cinzas volantes afectam a grande maioria das propriedades do betão endurecido, referindo-se com mais detalhe as resistências mecânicas e as propriedades relacionadas com a durabilidade. A incorporação de cinzas volantes no betão influencia a taxa de hidratação do cimento e, assim, o desenvolvimento das resistências mecânicas. Usualmente, as reacções pozolânicas só ocorrem após o início da hidratação do cimento, quando se começa a formar o hidróxido de cálcio. Assim, com a substituição de parte do cimento por cinzas volantes, a taxa de hidratação nas primeiras idades é retardada.

De um modo geral, as cinzas volantes contribuem para a diminuição dos valores das resistências mecânicas do betão nas primeiras idades. No entanto, quando são atingidas idades mais avançadas, os betões com cinzas volantes podem apresentar resistências mecânicas semelhantes ou até mesmo superiores às determinadas em betões de controlo, sem adição de cinzas. Uma vez que a reacção pozolânica é lenta mas prolongada, verifica-se uma recuperação dos níveis de resistência nos betões com cinzas ao longo do tempo, caso estes sejam curados devidamente. Segundo Fraay *et al.*, (1989), no caso das cinzas volantes de baixo teor de cálcio, ao fim de um ano a quantidade de cinzas que ainda não reagiu pode atingir 50%.

Há consenso entre os diversos autores em relação a que uma cura húmida prolongada é indispensável nos betões com adição de cinzas volantes, uma vez que as reacções destas com o cimento, na presença de água, são lentas. Em qualquer betão, uma cura adequada é fundamental para garantir um desenvolvimento correcto das resistências mecânicas e a baixa porosidade e permeabilidade da sua camada superficial. No caso de um betão com cinzas, esta situação é ainda mais importante na medida em que a reacção pozolânica das cinzas é feita à custa do hidróxido de cálcio libertado na hidratação do cimento, na presença de água, sendo fundamental o processo de cura para a

sua contínua hidratação. Bentur e Jaegermann, (1991) referem que quanto maior for a quantidade de cinzas, maior é a sensibilidade de um betão a uma cura inadequada.

Não existe consenso no que diz respeito à quantidade máxima de cimento que deve ser substituído por cinzas volantes. Segundo Odler (1991) e Neville (1995) uma quantidade excessiva de cinzas volantes não é benéfica no que concerne ao desenvolvimento das resistências mecânicas, apontando para um valor máximo de 30% em relação ao peso total de ligante. Sousa Coutinho (1988) indica valores até 40%. No entanto, testes realizados por Rodway e Fedirko (1992) em betões com percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes de 56% a 68%, revelaram que as resistências aos 28 dias destes betões eram idênticas e, nalguns casos, superiores às do betão de referência, sem cinzas volantes.

Enquanto que para betões com cimento portland existem diferentes métodos, que a partir da sua composição permitem fazer uma estimativa da resistência à compressão do betão, de acordo com Neville (1995) não é possível prever quantitativamente os efeitos das cinzas volantes na resistência do betão.

Temperaturas elevadas durante a cura, entre 20 e 80°C, aceleram mais o desenvolvimento de resistências num betão com cinzas do que num betão de referência, só com cimento. Contudo, verifica-se, tal como no betão de referência, uma quebra de resistências em idades superiores (Neville, 1995).

A redução da resistência, para um aumento de temperatura entre 200 e 800°C, é também semelhante, ou possivelmente superior à do betão de referência (Papayianni e Valiasis, 1991)

Outra questão importante e que deve ser tida em conta, prende-se com o facto de as cinzas volantes possuírem uma massa volúmica consideravelmente inferior à do cimento (cerca de 2350 kg/m³ ao invés dos 3150 kg/m³ do cimento), o que implica que para a mesma massa, o volume de cinzas volantes é cerca de 30% superior ao do cimento. Esta situação deve ser considerada na determinação das proporções da mistura, levando normalmente à utilização de uma menor quantidade de agregado fino do que num betão contendo apenas cimento (Neville, 1995).

A incorporação de cinzas volantes no betão geralmente beneficia os parâmetros relacionados com a durabilidade, desde que seja, tal como foi referido, assegurada uma cura adequada. Das propriedades relacionadas com a durabilidade referem-se, em primeiro lugar as que caracterizam a estrutura porosa do betão.

Há consenso entre os diversos autores, de que uma adição de cinzas volantes contribui para uma redução do volume de poros e uma diminuição do seu tamanho, a partir de determinadas idades.

Por um lado, a menor quantidade de água que betões com adição de cinzas volantes requerem contribui para uma estrutura mais densa, logo menos porosa. Por outro lado, devido à sua forma esférica e pequena dimensão, as cinzas tendem a preencher os vazios entre os grãos de cimento de maiores dimensões, compactando a estrutura das argamassas. Nos poros capilares preenchidos por água as cinzas volantes experimentam uma reacção pozolânica com o hidróxido de cálcio, Ca(OH)₂, libertado durante a hidratação dos silicatos do cimento. Como resultado, ocorre um refinamento da rede porosa com a consequente diminuição do tamanho dos poros. Concomitantemente, verifica-se uma diminuição no volume dos poros, fruto do efeito físico e pozolânico das cinzas volantes. Através deste processo, a permeabilidade da pasta de cimento hidratada bem como a porosidade da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado são reduzidas (Joshi e Lohtia, 1995).

Teles (2002) refere que a redução da porosidade pode estar relacionada com a granulometria das cinzas, partículas finas, mas com uma elevada gama de tamanhos.

Segundo Joshi e Lohtia (1995), nas primeiras idades os betões que contêm elevadas percentagens de cinzas volantes (cerca de 50% de substituição) apresentam-se mais permeáveis do que betões convencionais. Esta tendência é revertida a partir dos 180 dias quando a actividade pozolânica das cinzas é predominante, sendo a permeabilidade reduzida.

A diminuição do tamanho dos poros nas argamassas com cinzas volantes é apontada também por outros autores (Neville, 1995; Mota Miranda, 2006).

Estudos realizados por Joshi *et al.* (1993), revelaram um baixo nível de durabilidade aos ciclos gelo/degelo dos betões com cinzas volantes que não continham introdutores de ar. Verificou ainda, como referido, que para se obter uma dada quantidade de ar introduzido, a dosagem de adjuvante introdutor de ar nos betões com cinzas volantes é superior às dos betões correntes, sem cinzas. Este facto está relacionado com a tendência do carbono presente nas cinzas volantes de absorver os adjuvantes introdutores de ar e, quanto maior for o teor de carbono das cinzas, maior terá de ser a quantidade de adjuvante adicionada para se obter um dado teor de ar introduzido.

Em relação à resistência à abrasão do betão com cinzas volantes, Bijen, refere num relatório da RILEM (1991) que a introdução destas adições não altera a resistência à abrasão. Contudo, Bilodeau *et al.* (1994) apresentam um trabalho em que a resistência à abrasão do betão com cinzas volantes é superior à de um betão padrão, sem cinzas.

Como se referiu, uma das vantagens da utilização de cinzas volantes no betão é diminuição da concentração em hidróxido de cálcio da solução de contacto com os componentes hidratados do cimento portland. Os silicatos e aluminatos que se formam são menos básicos do que os do cimento, com um pH de equilíbrio de cerca de 11, o que impede as reacções expansivas do sulfato com os aluminatos, quer do cimento quer do agregado, e dos álcalis do cimento com a sílica, silicatos ou carbonatos do agregado (Coutinho, 1988).

A adição de cinzas volantes tem mostrado um ganho significativo na resistência do betão ao ataque por sulfatos. Estudos realizados por Joshi *et al.* (1987) demonstram que utilizando 15% de substituição do cimento por cinzas volantes de origem sub-betuminosa, a resistência de argamassas ao ataque por sulfatos, quando expostas a soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4) e sulfato de magnésio (MgSO_4) com concentração inferior a 10%, melhora significativamente. Para concentrações mais elevadas, a utilização de cimento resistente aos sulfatos conjuntamente com 15% de substituição por cinzas volantes, exibiu uma resistência adequada a este tipo de ataque.

Langan *et al.* (1983) referem o efeito favorável da incorporação de cinzas volantes em betões (até 50% de cinzas relativamente à massa total de ligante) na resistência ao ataque por sulfatos.

O trabalho de Von Fay e Pierce (1989) evidencia que as cinzas volantes da classe F (de baixo teor de cálcio) são mais eficazes do que as cinzas volantes da classe C (elevado teor de cálcio), uma vez que as últimas apresentam maiores expansões devidas ao ataque por sulfatos. Portanto, quanto menor for o teor de cálcio das cinzas volantes, melhor será o seu comportamento face ao ataque por sulfatos.

Em relação às reacções álcalis-silica e álcalis-silicatos deve-se ter presente que na composição das cinzas volantes há álcalis, no entanto, apenas um sexto do conteúdo total de álcalis das cinzas é solúvel em água e portanto potencialmente reactivo. No entanto (Nixon *et al.*, 1986) afirma que a possível contribuição dos álcalis das cinzas depende da alcalinidade do cimento utilizado. Contudo, só são relatados na bibliografia alguns casos isolados destas reacções quando pequenas percentagens de cimento são substituídas por este tipo de adições (IStructE, 1992).

Neville (1995) refere que as cinzas volantes quando presentes na mistura numa quantidade adequada são benéficas na redução da reacção álcalis-silica, contudo os mecanismos envolvidos são complexos e o estado actual do conhecimento ainda não permite a sua total compreensão.

O efeito benéfico das cinzas pode ter origem na estrutura mais densa da mistura, que impede a circulação dos iões ou devido à reacção preferencial dos álcalis com as cinzas, uma vez que estes deixam de estar disponíveis para reagir com a sílica dos agregados (Wesche, 1991).

Joshi e Lohtia (1995) referem que em trabalhos realizados por diversos investigadores utilizando 36% a 48% de cinzas volantes como substituição de um cimento com elevado teor de álcalis, a redução da expansão provocada pela reacção álcali-silica rondava os 75%. No entanto, algumas cinzas volantes de elevado teor de cálcio, contendo elevadas quantidades de sulfatos alcalinos solúveis, podem agravar a reacção álcali-silica.

Estudos realizados em argamassas com agregados reactivos, contendo 20% a 40% de substituição de cimento por cinzas volantes mostram, após um ano, reduções da expansão entre 5% e 21%, para 20% de substituição; entre 34% e 89%, para 30% de substituição; e entre 47% e 92%, para 40% de substituição (Perry *et al.*, 1987).

Relativamente à corrosão das armaduras, como referido, as cinzas diminuem a concentração em hidróxido de cálcio do betão. O hidróxido de cálcio tem uma acção benéfica: ao originar um ambiente de elevada alcalinidade, é responsável pela formação de uma camada de óxido que envolve as armaduras (película passiva) e as protege contra a corrosão; a presença de elevada quantidade de hidróxido de cálcio tem um efeito retardador na progressão da carbonatação no betão; e a um aumento do teor em hidróxido de cálcio corresponde um aumento do teor crítico de cloretos.

Em relação à progressão da carbonatação, diferentes factores desempenham um papel importante, resultando o grau de carbonatação de um equilíbrio entre eles, sendo os mais importantes a alcalinidade e a porosidade da mistura. Bier (1987) refere o aumento da profundidade de carbonatação com a diminuição da quantidade de hidróxido de cálcio devido ao uso de cinzas no betão e, por sua vez, a maior dificuldade da difusão do dióxido de carbono, resultante da estrutura mais densa do betão com cinzas. A questão fundamental consiste em saber qual dos efeitos é predominante, no entanto a resposta não é fácil porque vai depender sempre, pelo menos, da alcalinidade do cimento e cinzas usados, assim como das respectivas dosagens.

Estudos realizados por Bier (1987) e Thomas e Matthews (1992) mostraram que em betões com teores de cinzas até 30% e com resistências à compressão superiores a 35 MPa que o aumento da carbonatação foi nulo ou muito pequeno. Mota Miranda (2006) em argamassas com substituições de 33 e 38% também não verificou qualquer diferença em relação às profundidades de carbonatação.

Em relação à penetração dos cloretos, embora a redução do pH do betão contribua para uma redução do teor crítico em cloretos, na bibliografia consultada não se encontraram casos de corrosão das armaduras por penetração de cloretos agravada pela presença de adições de cinzas volantes. Este facto é devido a que a redução da porosidade deve prevalecer sobre a diminuição do teor crítico em cloretos.

Segundo Al-Amoudi *et al.* (1993); Ellis Jr. *et al.* (1991); e Schiessl e Raupach (1989), quando é utilizada uma quantidade devidamente proporcionada de cinzas volantes no betão, a sua penetrabilidade é significativamente reduzida e aumenta a sua resistividade, reduzindo assim a taxa de corrosão.

Em trabalhos realizados por Cao et al. (1994) a passivação do aço e o risco de corrosão em argamassas com 60% de cinzas volantes não foi agravado em relação a uma argamassa padrão, só com cimento.

A resistividade eléctrica de um material cimentício pode correlacionar-se com a velocidade de corrosão das armaduras nele incorporadas, informando sobre a velocidade da corrosão, uma vez criadas as condições para a sua iniciação. Contudo, não fornece qualquer informação sobre o estado da armadura, isto é, se esta ainda está passivada ou não e, neste caso se a corrosão já se iniciou.

O aumento da resistividade eléctrica do material traduz-se na redução do fluxo da corrente eléctrica por unidade de tempo e, conseqüentemente, a progressão da corrosão do aço no seu interior fica limitada. Segundo Andrade *et al.* (2002), com base em medições da velocidade de corrosão *in situ* em estruturas, a resistividade eléctrica é a propriedade que representa com maior sensibilidade a velocidade de corrosão. No entanto, Ribeiro (2004) considera que esta afirmação é verdadeira apenas para valores da resistividade superiores a 100 $\Omega.m$.

Normalmente, atribuem-se a diferentes gamas de resistividade diferentes probabilidades de corrosão, como se ilustra no Quadro 2.6, sendo os valores apresentados normalmente usados como escala para relacionar a severidade da corrosão com a resistividade eléctrica (ACI 222R-01, 2003).

Quadro 2.6 – Variação da probabilidade de corrosão com a resistividade do material cimentício (ACI 222R-01, 2003).

Progressão da corrosão	Resistividade do material ($\Omega.m$)
Baixa	> 200
Baixa a moderada	$100 < \rho < 200$
Elevada	$50 < \rho < 100$
Muito elevada	$\rho < 50$

Existem diversos factores que influenciam a resistividade eléctrica do betão, como o teor de humidade, a temperatura e a razão água/cimento (A/C). Quanto menor for o teor de humidade do betão maior será a sua resistividade. O aumento de temperatura é acompanhado por um aumento da mobilidade iónica e da dissolução de iões para a solução intersticial, conduzindo a uma diminuição da resistividade (Hughes *et al.*, 1985).

O uso de cinzas volantes em betão pré-esforçado está proibido em alguns países devido ao carbono presente nas cinzas poder acelerar a corrosão sobre tensão do aço de pré-esforço (CUR, 1991).

Um aumento da temperatura de cura do betão acelera as reacções químicas de hidratação, afectando benéficamente as resistências iniciais do betão, sem induzir perdas de resistência a longo prazo. Uma temperatura mais elevada durante a colocação e presa do betão aumenta as resistências iniciais, no entanto, pode afectar adversamente as resistências a partir dos sete dias. Este facto pode ser explicado uma vez que a rápida hidratação inicial parece formar produtos de pior estrutura física, provavelmente mais porosos, levando a que parte dos poros permaneça por preencher (Neville, 2005).

Segundo Marsh *et al.* (1986), uma temperatura elevada acelera mais as reacções das cinzas volantes do que quando temos apenas cimento portland, uma vez que a reactividade das cinzas volantes aumenta grandemente com uma elevação da temperatura.

3

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS**3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

No presente capítulo apresentam-se os critérios de selecção dos diferentes materiais utilizados na composição das argamassas, a sua caracterização e a composição das argamassas.

No estudo experimental usaram-se os seguintes materiais:

- Areia normalizada CEN, com origem em França, Leucate, fornecida pela SNL (Societe Nouvelle du Littoral);
- Cimento CEM I 42,5 R, proveniente da fábrica do Outão, fornecido pela SECIL;
- Cinzas volantes, provenientes de Ponferrada na Galiza, cedidas pela Unibetão – Indústrias de Betão Preparado, S.A.

Estudaram-se quatro argamassas, uma de cimento, que serviu de referência, e três com substituição de cinzas volantes em diferentes proporções. Todas as argamassas têm o mesmo traço (1:3), igual soma de cimento com cinzas volantes (C+CV) e a mesma consistência por espalhamento ($110 \pm 2 \%$).

Para a realização das amostras a utilizar no trabalho experimental, reuniu-se a quantidade suficiente de todos os materiais, considerando a hipótese de ter que repetir alguns ensaios. Os materiais foram armazenados de forma a evitar qualquer contaminação, a areia, tal como foi fornecida, em sacos plásticos hermeticamente fechados, e o cimento e as cinzas volantes em bidões. Os materiais foram conservados numa sala com ambiente seco, para evitar o seu envelhecimento e degradação.

Na caracterização dos materiais consideraram-se os boletins de autocontrolo, fornecidos pelos fabricantes, e ensaios realizados no Laboratório de Ensaio de Materiais de Construção (LEMC). O cimento, as cinzas volantes e as diferentes argamassas foram também observados e analisados por microscopia electrónica de varrimento (MEV) no Centro de Materiais da Universidade do Porto (CEMUP), recorrendo-se a um microscópio modelo FEI QUANTA 400 FEG ESEM, equipado com micro análise por raios X (EDAX PEGASUS X4M). Todas as amostras foram revestidas a ouro e observadas e estudadas por electrões secundários a 10 e 15 keV e por períodos de tempo útil (“livetime”) iguais a 50 segundos. Algumas amostras foram também observadas e analisadas por electrões retro-difundidos.

3.2. AGREGADOS

Utilizou-se uma areia normalizada CEN, certificada conforme a norma NP EN 196-1 (1996) e controlada pelo Laboratoire d'Essais des Matériaux de la Ville de Paris.

Esta areia é uma areia natural, siliciosa com grãos arredondados, cujo teor de sílica é pelo menos igual a 98%, estando a sua composição granulométrica compreendida entre os limites referidos no Quadro 3.1 (NP EN 196-1, 1996).

A principal razão para a escolha desta areia tem a ver com a possibilidade de posteriormente se estudar a influência da petrografia do agregado nas propriedades das argamassas.

Quadro 3.1 – Composição granulométrica do agregado utilizado nas argamassas (NP EN 196-1, 1996).

Abertura dos peneiros com malha quadrada (mm)	Resíduos acumulados (%)
2,0	0
1,6	7 ± 5
1,0	33 ± 5
0,5	67 ± 5
0,16	87 ± 5
0,08	99 ± 5

Para confirmar a composição granulométrica da areia normalizada, procedeu-se à sua determinação utilizando-se como amostra um dos sacos de areia, totalizando 1349,5 g de material (Quadro 3.2).

Quadro 3.2 – Composição granulométrica do agregado determinada experimentalmente.

Abertura dos peneiros com malha quadrada (mm)	Massa retida (g)	Resíduos acumulados (%)
2,0	0,0	0,0
1,6	106,8	7,94
1,0	367,3	35,23
0,5	464,8	69,77
0,16	249,0	88,27
0,08	156,4	99,90
	1,4	100
Total	1345,7	

Verifica-se, portanto, que os resultados obtidos experimentalmente estão de acordo com os normalizados.

3.3. CIMENTO

Para o fabrico das argamassas escolheu-se um cimento CEM I, por ser o tipo de cimento que menores percentagens de adições pode conter, uma vez que, obrigatoriamente, tem pelo menos 95% de clínquer do cimento portland (NP EN 197-1, 2001). A utilização de qualquer outro tipo de cimento

(CEM II, CEM III, CEM IV ou CEMV) tornaria difícil interpretar e controlar as características finais das argamassas, dada a variabilidade da sua composição.

Por ser essencialmente constituído por clínquer do cimento portland, desenvolve maiores resistências mecânicas iniciais do que os restantes cimentos. Optou-se pela classe de resistência 42,5 R, por ser esta a que vulgarmente é utilizada em argamassas de reparação estrutural (Ribeiro, 2004)

Assim, na confecção das argamassas, usou-se um cimento portland tipo I da classe de resistência 42,5, com resistência elevada aos primeiros dias (CEM I 42,5 R), fornecido pela SECIL, conjuntamente com os resultados do autocontrolo à remessa de cimento (Quadro 3.3)

Quadro 3.3 – Boletim de autocontrolo da remessa de cimento utilizada.

Ensaaios mecânicos (NP EN 196-1)				
Idade	Resistências (MPa)			
	Flexão		Compressão	
	Mensal	Anual	Mensal	Anual
2 dias	6,1	6,0	35,2	33,5
7 dias	7,3	7,5	46,6	46,6
28 dias	8,0	8,3	55,8	56,7
Ensaaios Físicos				
			Mensal	Anual
Peso Específico (g/cm³)			3,11	3,12
Resíduo de Peneiração (%)	90 µm			
	63 µm			
	45 µm		1,3	1,6
	32 µm			
Superfície Específica de Blaine (cm²/g) [NP EN 196-3]			4194	4065
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]			29,1	28,7
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início		141	144
	Fim		173	183
Expansibilidade (mm) [NP EN 196-3]			0,6	0,6
Análise Química				
			Mensal	Anual
Perda ao Fogo (%)		P.F.	2,90	3,06
Resíduo Insolúvel (%)		R.I.	1,33	0,99
Óxido de Silício (%)		SiO₂	20,82	19,64
Óxido de Alumínio (%)		Al₂O₃	3,93	4,12
Óxido de Ferro (%)		Fe₂O₃	3,51	3,40
Óxido de Cálcio (%)		CaO	63,37	62,62
Óxido de Magnésio (%)		MgO	2,60	2,64
Sulfatos (%)		SO₃	2,81	2,91
Cloretos (%)		Cl⁻	0,04	0,04
Cal livre (%)			1,69	1,55

Em relação aos ensaios físicos e mecânicos, foram determinados a massa volúmica, a finura, a superfície específica, a água na pasta normal o tempo início e fim de presa, a expansibilidade e as resistências à flexão e à compressão aos 2, 7 e 28 dias. As propriedades químicas do cimento avaliadas foram a perda ao fogo, o resíduo insolúvel e a composição em óxidos elementares (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , SO_3), o teor em cloretos (Cl^-) e em CaO livre.

Aceitaram-se os resultados do boletim de autocontrolo, que respeitavam os requisitos exigidos ao cimento (NP EN 197-1, 2001). No entanto, para o desenvolvimento do trabalho experimental, que se apresenta no capítulo seguinte, determinaram-se as resistências mecânicas, os tempos de presa e a água na pasta normal. No Quadro 3.4 apresenta-se uma comparação dos valores obtidos. Enquanto que as resistências e a água na pasta normal foram idênticas, o tempo de presa foi consideravelmente diferente, facto também apontado por Mota Miranda (2006). Assim, determinou-se o tempo de presa com outro operador, tendo-se chegado a resultados semelhantes.

Quadro 3.4 – Comparação entre os valores experimentais e os fornecidos no boletim de autocontrolo (média mensal).

Ensaio Mecânicos [NP EN 196-1]				
Idade	Resistências (MPa)			
	Flexão		Compressão	
	SECIL	Dissertação	SECIL	Dissertação
2 dias	6,1	6,2	35,2	30,0
7 dias	7,3	7,9	46,6	41,5
28 dias	8,0	8,9	55,8	54,0
Ensaio Físicos				
			SECIL	Dissertação
Tempo de Presa (min) [NP EN 196-3]	Início		141	180
	Fim		173	255
Água na Pasta Normal (%) [NP EN 196-3]			29,1	30,8

A análise química permite quantificar os componentes principais do cimento (silicato tricálcico, silicato bicálcico, aluminato tricálcico e aluminoferrato tetracálcico), através do método proposto por Bogue (Sousa Coutinho, 1988) e hoje universalmente aceite como primeira aproximação para a determinação da composição potencial do cimento.

Assim, através da norma (ASTM C 150, 1998), calcularam-se as percentagens de cada componente principal do cimento, sendo os valores obtidos apresentados no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Percentagens dos componentes principais do cimento.

Componente	Média mensal (%)	Média anual (%)
Silicato tricálcico (C_3S)	63,48	65,97
Silicato bicálcico (C_2S)	8,07	3,78
Aluminato tricálcico (C_3A)	4,48	5,17
Aluminoferrato tetracálcico (C_4AF)	10,67	10,34

Estes componentes principais contribuem de modo diferente para as propriedades do betão, nomeadamente resistências, calor de hidratação e durabilidade química do betão (Neville, 1995).

O aspecto mais relevante para este trabalho, que decorre da análise desta composição do cimento, é a elevada percentagem de silicato tricálcico, que por um lado vai contribuir para um maior desenvolvimento inicial de resistências e por outro lado, uma vez que as quantidades de hidróxido de cálcio libertadas são muito elevadas, originar um ambiente de elevada alcalinidade.

A presença de elevada quantidade de hidróxido de cálcio tem um efeito retardador na progressão da carbonatação no betão e a um aumento do teor em hidróxido de cálcio corresponde um aumento do teor crítico de cloretos, teor a partir do qual se pode dar a destruição da película passiva (Teles, 2007), podendo-se por isso afirmar que a sua acção é benéfica em relação à corrosão das armaduras.

Analysaram-se e observaram-se por microscopia electrónica de varrimento mais de 100 partículas de uma amostra de cimento. Na Figura 3.1 apresentam-se imagens e espectros de algumas partículas. A grande maioria das partículas é maioritariamente constituída por silicatos de cálcio (P1, P3 e P4), apenas se isolou aluminato ou aluminoferrato de cálcio numa partícula (P7) e encontraram-se sete partículas de gesso (P5). A partícula P2, com uma textura muito diferente das outras, é mais rica em alumínio, magnésio e enxofre, contendo ainda algum ferro e potássio.

As observações e análises efectuadas sobre a amostra de cimento são coerentes com a composição potencial do cimento, rico em silicato tricálcico e muito pobre em aluminato tricálcico.

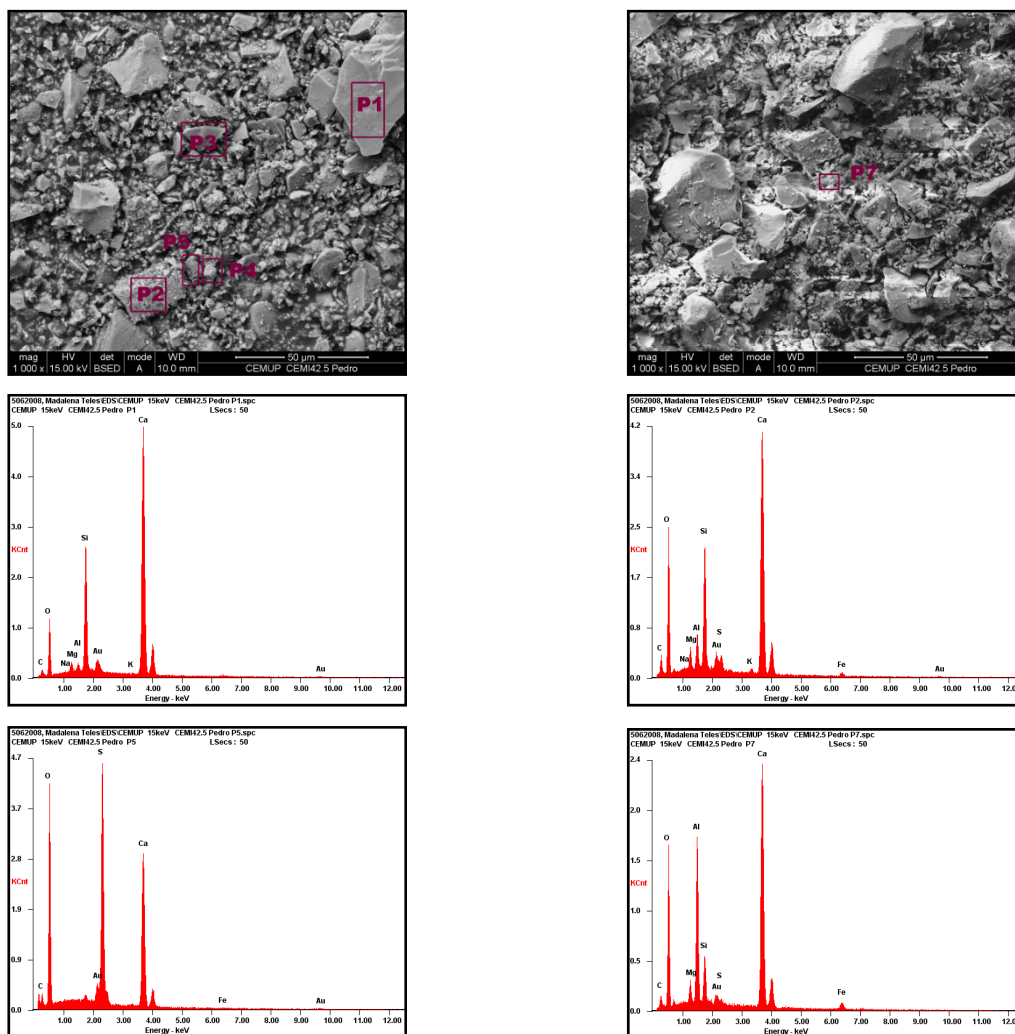


Figura 3.1 – Imagens e espectros de partículas de cimento.

No Quadro 3.6 apresenta-se a análise química semi-quantitativa de sete partículas de cimento.

Quadro 3.6 – Composição química de sete partículas de cimento.

Compostos	Quantidades (% em massa)						
	Espectro						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
Na ₂ O	0,74	0,27	0,35	0,13	0,08	0,26	0,22
MgO	2,35	2,89	1,22	1,19	0,13	0,51	2,71
Al ₂ O ₃	2,07	4,76	1,75	1,11	0,38	0,44	23,61
SiO ₂	25,20	22,11	17,73	27,30	1,06	2,02	8,71
P ₂ O ₅	1,24	0,00	1,31	0,00	0,13	0,19	0,14
SO ₃	0,98	3,69	2,07	0,53	57,45	54,36	1,16
Cl ₂ O	0,16	0,25	0,63	0,00	0,00	0,00	0,05
K ₂ O	0,18	0,86	0,76	0,31	0,40	0,82	0,22
CaO	65,72	61,32	71,81	66,84	39,64	39,85	55,96
TiO ₂	0,10	0,36	0,75	0,18	0,16	0,37	0,39
Fe ₂ O ₃	1,24	3,48	1,63	2,41	0,56	1,19	6,84

3.4. CINZAS VOLANTES

As cinzas volantes utilizadas, provenientes de Ponferreda, foram escolhidas por terem demonstrado ser de muito boa qualidade, quer em betões preparados na Unibetão, quer em trabalhos de investigação realizados na FEUP (Teles, 2002, Mota Miranda, 2006).

Juntamente com as cinzas volantes a Unibetão forneceu o resultado dos ensaios necessários à verificação da conformidade (ensaios químicos – perda ao fogo, cloretos, trióxido de enxofre e óxido de cálcio livre; e ensaios físicos – finura, índice de actividade, expansibilidade e massa volúmica) realizados na APEB (Associação Portuguesa de Empresas de Betão Pronto). Os valores obtidos para cada ensaio, a norma de ensaio e os limites do valor característico para a verificação da conformidade (NP EN 450-1) são apresentados no Quadro 3.7.

Quadro 3.7 – Boletim de autocontrolo das cinzas volantes.

Ensaio Químicos		Norma Ref. ^a	Limites	Resultados de ensaio	Observações
Q1	Perda ao Fogo	NP EN 196-2	máx: 7%	4,2%	Conforme
Q2	Cloretos	NP EN 196-21	máx: 0,1%	< 0,01%	Conforme
Q3	Trióxido de enxofre	NP EN 196-2	máx: 3%	0,5%	Conforme
Q4	Óxido de cálcio livre	NP EN 451-1	máx 1%	< 0,01%	Conforme
Ensaio Físicos		Norma Ref. ^a	Limites	Resultados de ensaio	Observações
F1	Finura	NP EN 451-2	máx: 40%	22,4%	Conforme
F2	Índice de actividade (28d)	NP EN 196-1	mín: 75%	79,0%	Conforme
	Índice de actividade (90d)	NP EN 196-1	mín: 85%		Conforme
F3	Expansibilidade	NP EN 196-3	máx: 10 mm	Q4 = Conforme	Q4 = Conforme
F4	Massa volúmica	NP EN 196-6	—	2,39 g/cm ³	—

Notas:

Q4 – Para valores > 1% mas < 2,5% deve cumprir com a expansibilidade.

F1 – A variação da finura não deve ser superior a 10 pontos percentuais em torno do valor médio declarado pelo produtor.

F3 – Este ensaio só se realiza se: óxido de cálcio livre > 1%.

F4 – A variação da massa volúmica não deve exceder 150 kg/m³ em torno do valor médio declarado pelo produtor.

Observaram-se e analisaram-se por MEV mais de 150 partículas. A observação mostrou, uma enorme variedade de raios das partículas e embora a maior parte apresente a superfície lisa, algumas mostram uma textura rugosa. Na Figura 3.2 ilustram-se algumas das medições de diâmetros realizadas e na Figura 3.3 mostram-se cinzas volantes com diferentes aspectos e texturas.

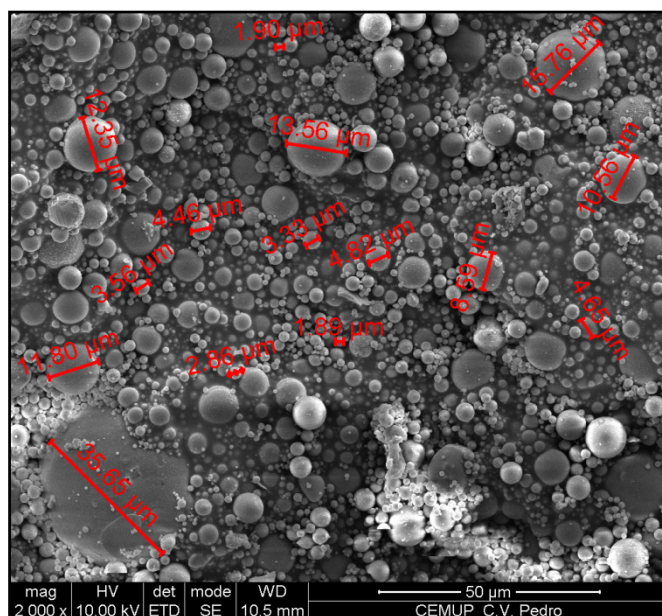


Figura 3.2 – Diâmetros de partículas de cinzas volantes.

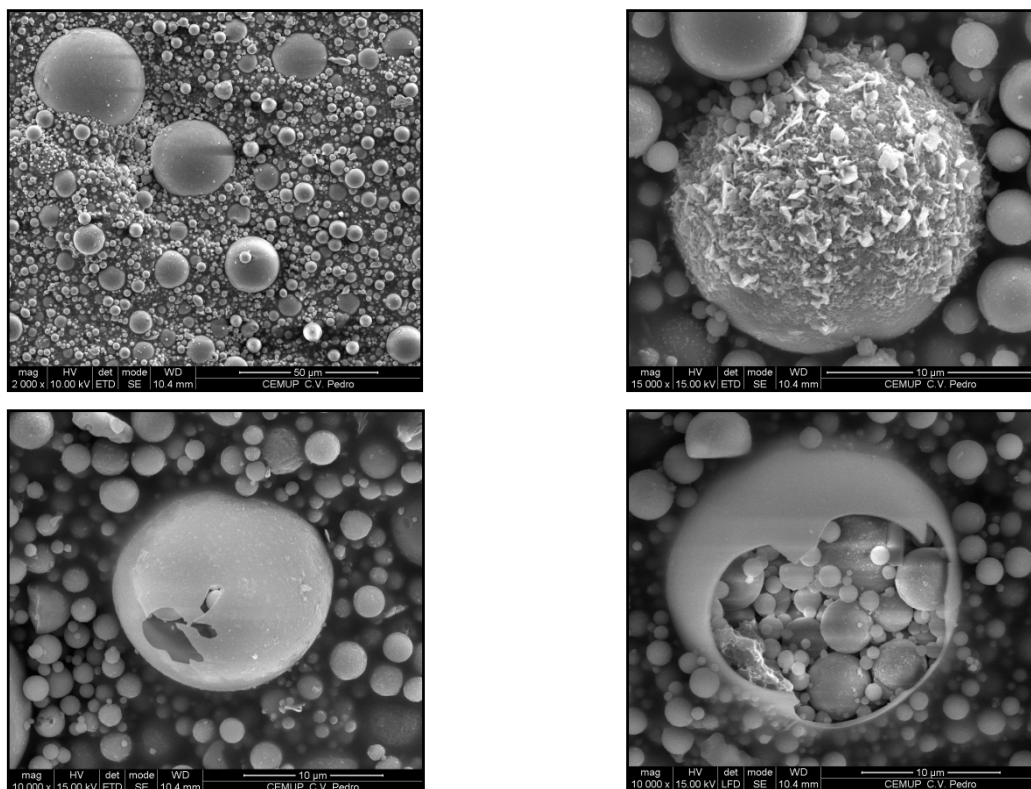


Figura 3.3 – Cinzas volantes com diferentes texturas.

A análise feita a partículas de diversas dimensões e texturas revelou que a maioria das partículas é muito rica em alumínio e silício, com algum potássio e pouco sódio e também algum magnésio (P2, P6, P7, P10), algumas partículas são muito ricas em ferro (P1, P3, P4, P9) e, encontrou-se apenas uma partícula rica em titânio (P8) e outra rica em magnésio (P5). As cinzas volantes com textura rugosa são quimicamente semelhantes às partículas mais abundantes, muito ricas em alumínio e silício, com algum potássio e pouco sódio e também algum magnésio (Figura 3.4).

A forma, aspecto e textura das diferentes partículas está, de uma maneira geral, de acordo com os diferentes autores referidos em 2.2.2.2. Contudo, não se encontraram cinzas volantes porosas e as partículas observadas de maiores dimensões têm um diâmetro da ordem de 50 μm , muito inferior às 100 μm ou 150 μm , referidas na bibliografia analisada. As reduzidas dimensões das partículas, conjuntamente com a ausência de partículas porosas, está de acordo com a sua composição química, muito pobre em carbono. Este facto infere-se do ensaio da perda ao fogo que apresenta valores baixos, assim como das análises ao microscópio electrónico de varrimento.

Em relação à composição química das cinzas volantes, refere-se apenas que está de acordo com a bibliografia analisada.

A observação das partículas por MEV permite concluir que a sua finura é muito pequena. Este facto era já indiciado pelo boletim de autocontrolo das cinzas que mostrava um resíduo de peneiração (peneiro 45 μm) baixo. Esta observação permite concluir, que no caso das cinzas utilizadas neste estudo, a sua elevada superfície específica é provocada, fundamentalmente, pela contribuição da fracção fina (Jalali, 1991) e não devido à presença de partículas porosas de grandes dimensões (Alonso e Wesche, 1991).

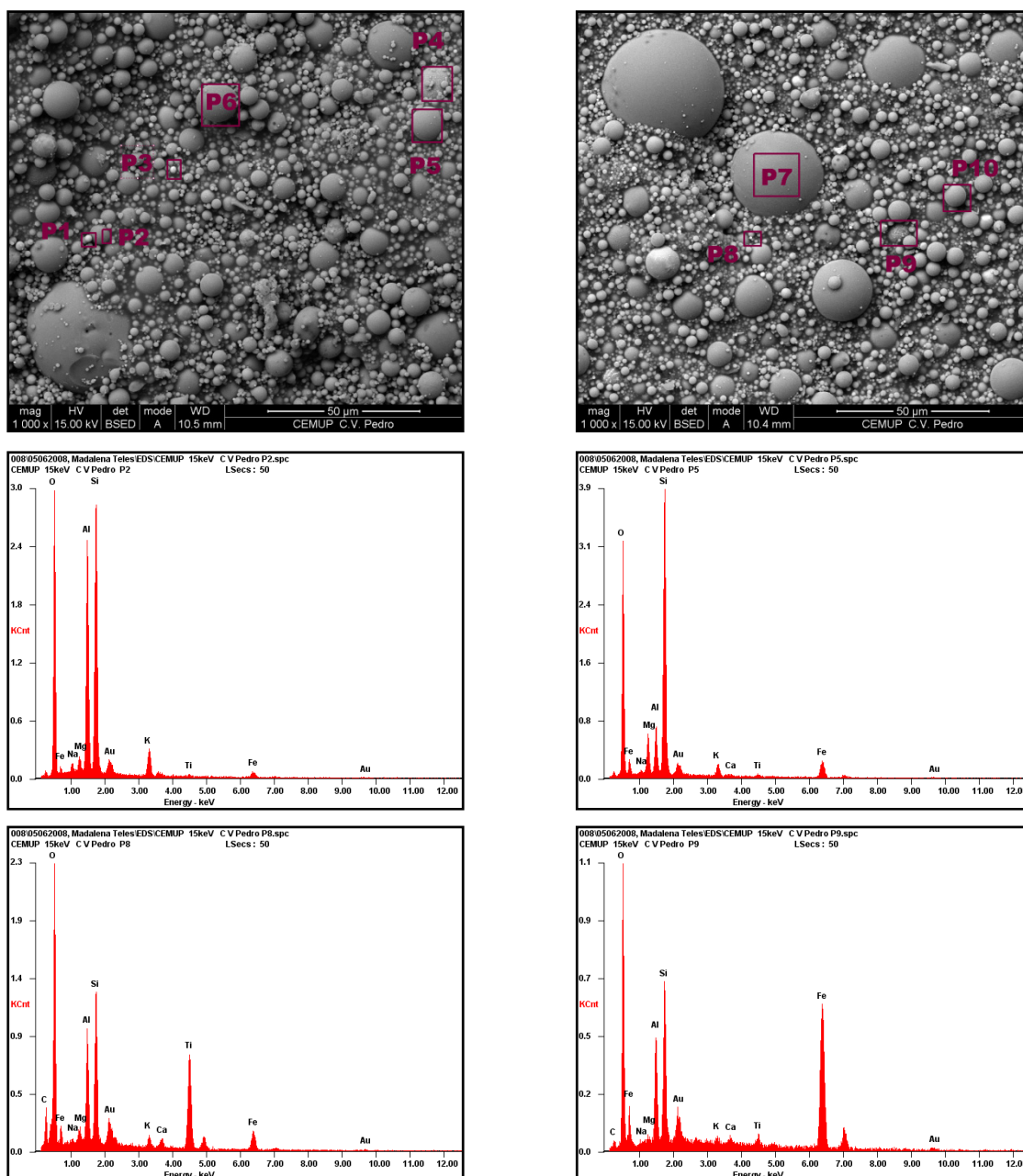


Figura 3.4 – Imagens e espectros de partículas de cinzas volantes.

No Quadro 3.8 apresenta-se a análise química semi-quantitativa de dez partículas.

Quadro 3.8 – Composição química das cinzas volantes.

Compostos	Quantidades (% em massa)									
	Espectro									
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
Na ₂ O	0,00	1,05	0,69	1,06	0,67	1,02	0,63	0,54	0,33	1,11
MgO	0,74	1,77	2,07	0,98	6,31	1,14	0,59	1,88	0,61	1,39
Al ₂ O ₃	9,77	31,67	7,13	23,13	7,93	27,63	40,83	14,67	10,03	30,27
SiO ₂	14,49	53,09	11,00	37,17	60,99	60,25	51,92	25,24	16,38	52,08
P ₂ O ₅	0,21	0,14	0,10	0,15	0,17	0,00	0,32	0,34	0,33	0,14
SO ₃	0,70	0,31	0,00	0,28	0,39	0,00	0,33	1,57	0,44	0,00
Cl ₂ O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00	0,05	0,09	0,13	0,00
K ₂ O	0,41	5,07	0,27	2,43	2,73	5,50	2,25	1,71	0,71	4,97
CaO	0,90	0,59	1,68	0,41	0,71	0,45	0,27	1,93	0,81	0,58
TiO ₂	0,60	0,93	0,38	1,04	1,33	0,47	0,40	37,30	2,07	3,88
Fe ₂ O ₃	72,19	5,37	76,68	33,35	18,68	3,54	2,41	14,74	68,16	5,58

3.5. ARGAMASSAS

Foram estudadas quatro argamassas com diferentes quantidades de cimento e cinzas volantes mas mantendo constante a quantidade total da soma de cimento com cinzas volantes (C+CV), que se fixou em 450 g por amassadura. Em todas as argamassas o traço é de 1:3, em peso. A argamassa de referência (AMP) é apenas constituída por cimento portland, enquanto que as argamassas AM1, AM0 e AM2 contêm percentagens de substituição de cimento por cinzas volantes (relativamente à massa total de C+CV) de, respectivamente, 45%, 50% e 60%.

No Quadro 3.9 são apresentadas as composições das diversas argamassas. A quantidade de água foi determinada de modo a garantir uma consistência por espalhamento de 110±2%, uma vez que a experiência mostra ser este o valor que permite que a argamassa seja aplicada manualmente em obra com facilidade (Ribeiro, 2004). Não foi adicionado qualquer tipo de adjuvante às argamassas.

Quadro 3.9 – Composição das argamassas estudadas (por amassadura).

Argamassa	Cimento (g)	Cinzas volantes (g)	Areia (g)	Água (g)	Razão A/(C+CV)
AMP	450	0	1350	217,1	0,482
AM1 (45% CV)	250	200	1350	188,6	0,419
AM0 (50% CV)	225	225	1350	187	0,416
AM2 (60% CV)	180	270	1350	177,5	0,394

Optou-se por percentagens elevadas de substituição de modo a obter um produto com bom desempenho mecânico e elevada durabilidade, sendo ao mesmo tempo mais económico e vantajoso em termos ambientais. Malhotra *et al.* (1985) iniciaram estudos em betão estrutural contendo elevadas quantidades de substituição do cimento por cinzas volantes (> 50%), tendo obtido excelentes

resultados. São poucos os estudos que se conhecem na área das argamassas, apresentando os realizados percentagens de substituição relativamente baixas (Mota Miranda, 2006).

4

PROPRIEDADES ARGAMASSAS COM VOLANTES. ESTUDO EXPERIMENTAL

DAS CINZAS

4.1. INTRODUÇÃO

A reparação de estruturas de betão armado representa, como se referiu, uma fracção cada vez mais importante da actividade do sector da construção civil, sendo a corrosão das armaduras a degradação mais frequente (Salta, 1999).

A corrosão das armaduras, muitas vezes precoce, leva a um aumento cada vez maior dos custos inerentes à recuperação das estruturas. Assim, tem-se observado, a nível mundial, principalmente nos países mais desenvolvidos, uma preocupação crescente com a durabilidade do betão.

No presente trabalho pretende-se avaliar a potencialidade da utilização de argamassas de reparação de estruturas com corrosão das armaduras com elevados teores de cinzas volantes. As principais potencialidades das cinzas volantes, constituídas por partículas finas, mas com uma elevada gama de tamanhos, parecem estar relacionadas com a sua granulometria, contribuindo para uma grande diminuição da porosidade da argamassa, com a diminuição da concentração em hidróxido de cálcio e consequente redução da reactividade química. No entanto, tem que estar presente que esta utilização baixa o pH das argamassas, podendo acelerar a carbonatação do betão e consequentemente a corrosão.

Neste capítulo apresenta-se o programa experimental desenvolvido, com vista à determinação das propriedades físicas, mecânicas e químicas mais relevantes para a avaliação do comportamento estrutural e de durabilidade das argamassas estudadas. Procurou-se implementar um conjunto de ensaios laboratoriais de modo a analisar-se a viabilidade da utilização destas argamassas, com incorporação de elevadas quantidades de cinzas volantes, como argamassas estruturais de reparação de estruturas de betão armado com corrosão das armaduras.

No presente capítulo, após a apresentação da lista dos ensaios realizados, para cada propriedade caracterizada, faz-se uma breve descrição da metodologia do ensaio, seguida da apresentação e discussão dos resultados obtidos. O capítulo termina com uma conclusão onde é feita a análise global das diferentes propriedades.

4.2. LISTA DOS ENSAIOS REALIZADOS

Descrevem-se de seguida as diversas propriedades analisadas, as características dos provetes e, quando existe, a norma utilizada. Na ausência de normas, portuguesas ou estrangeiras, é referida a secção do texto onde é descrita a metodologia do ensaio (Quadro 4.1).

Quadro 4.1 – Lista dos ensaios realizados.

Ensaio	Provetes	Norma
Consistência por espalhamento	Tronco-cone	ASTM C 109 (1998)
Tempos de Presa	Tronco-cone	NP EN 196-3 (1996)
Resistência à flexão	40 x 40 x 160 [mm ³]	NP EN 196-1 (1996)
Resistência à compressão	metades dos provetes à flexão	NP EN 196-1 (1996)
Resistência ao desgaste por abrasão	60 x 60 x 25 [mm ³]	LNEC E 396 (1993) Processo A
Aderência – ensaio de corte	200 x 198 x 150 [mm ³]	descrito na secção 4.3.5.
Porosidade livre	40 x 40 x 45 [mm ³]	descrito na secção 4.3.6.
Absorção de água por capilaridade	40 x 40 x 45 [mm ³]	descrito na secção 4.3.7.
Ensaio de evaporação	40 x 40 x 45 [mm ³]	descrito na secção 4.3.8.
Profundidade de penetração da água sob pressão	100 x 100 x 100 [mm ³]	NP EN 12390-8 (2003)
Dissolução/Cristalização de sais solúveis	40 x 40 x 40 [mm ³]	descrito na secção 4.3.10.
Resistência à carbonatação acelerada	40 x 40 x 160 [mm ³]	LNEC E 391 (1993)
Resistência à penetração de cloretos	Φ100 x 50 [mm ³]	LNEC E 463 (2004)
Resistividade eléctrica	Φ100 x 50 [mm ³]	descrito na secção 4.3.13.
Resistência ao calor	40 x 40 x 160 [mm ³]	descrito na secção 4.3.14.

Deve referir-se que, também foi analisada a retracção das argamassas. No entanto, face a ter-se verificado que com o equipamento disponível não havia precisão para determinar esta propriedade, o seu estudo não foi considerado.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS

4.3.1. CONSISTÊNCIA POR ESPALHAMENTO

4.3.1.1. Descrição do ensaio

Para a determinação da consistência por espalhamento, foi seguida a metodologia preconizada na secção 10.3 da norma americana ASTM C109 (1998). Após a amassadura da argamassa, feita em condições normalizadas, esta é colocada num molde tronco-cónico, em duas camadas, sendo cada camada compactada com 25 pancadas uniformemente distribuídas. Depois da regularização da superfície, retira-se o molde e deixa-se cair a mesa de espalhamento 25 vezes durante 15 segundos. A argamassa espalha-se e faz-se a medição dos diâmetros de quatro diagonais. O valor da consistência por espalhamento, em percentagem, obtém-se subtraindo a cada diâmetro medido o valor da base do molde e fazendo a média destes quatro valores. Esta média é dividida pelo diâmetro do molde.



Figura 4.1 – Equipamento para a determinação da consistência por espalhamento.

4.3.1.2. Apresentação dos resultados

Tal como foi dito na introdução deste capítulo, este ensaio permitiu-nos determinar o teor em água para cada uma das argamassas, impondo um valor para a consistência de $110 \pm 2\%$. No Quadro 4.2 apresentam-se os valores obtidos.

Quadro 4.2 – Valores da consistência das argamassas.

Argamassa	Consistência
AMP	111,75%
AM1 (45% CV)	111,00%
AM0 (50% CV)	111,00%
AM2 (60% CV)	111,25%

4.3.1.3. Discussão dos resultados

Como os valores da consistência por espalhamento são muito próximos, as diferenças na quantidade de água podem ser atribuídas principalmente às dosagens de cimento e cinzas na composição das argamassas. Verifica-se que o efeito das cinzas volantes provoca uma diminuição da quantidade de água requerida, para uma dada consistência, quando comparado com a argamassa padrão.

De facto, para as percentagens de substituição estudadas é patente a diminuição da razão $A/(C+CV)$ com o aumento da percentagem de cinzas. A redução de água relativamente à argamassa de

referência (AMP) varia entre 13,1% para a argamassa AM1 (45% CV) e 18,3% para a argamassa AM2 (60% CV), sendo no entanto de referir que a consistência da argamassa padrão é ligeiramente superior.

As diferentes teorias para explicar este efeito redutor da água são apresentadas na secção 2.2.3.1.

4.3.2. TEMPOS DE PRESA

4.3.2.1. Descrição do ensaio

Para a determinação dos tempos início e fim de presa das diferentes misturas de cimento com cinzas volantes foi seguida a norma NP EN 196-3 (1996). O ensaio é realizado com o aparelho de Vicat (previamente regulado) sobre uma pasta de consistência normal, observando-se a penetração de uma agulha até que esta atinja um valor determinado.

Em primeiro lugar, é necessário determinar, por tentativas, a quantidade de água da pasta de consistência normal (realizada de acordo com o preconizado na secção 5 da referida norma). Para isso, produzem-se pastas com diferentes quantidades de água até que a penetração da sonda cilíndrica fique a uma distância de 6 ± 1 mm da placa da base. No caso das argamassas que contêm cinzas volantes, ajustaram-se as substituições de modo a manter as percentagens pretendidas, uma vez que a norma recomenda uma quantidade total de ligante de 500 g (Quadro 4.3). As cinzas volantes foram consideradas como ligante, uma vez que reagem com o hidróxido de cálcio, resultante da hidratação dos silicatos do cimento, na presença de água, para originar compostos com propriedades aglomerantes.

Para a determinação do tempo início de presa é utilizado novamente o aparelho de Vicat, substituindo-se a sonda cilíndrica por uma agulha. O ensaio é realizado em ambiente controlado a uma temperatura de 20 ± 1 °C e com humidade relativa superior a 90%. Atinge-se o início de presa quando a agulha fica a uma distância de 4 ± 1 mm da base. No caso do tempo fim de presa, volta-se o molde, ficando a parte inferior virada para cima e utiliza-se uma agulha munida de um acessório anelar, para facilitar a observação de penetrações fracas (0,5 mm). Considera-se que se atingiu o fim de presa quando o acessório anelar deixa de marcar a superfície do provete.

4.3.2.2. Apresentação dos resultados

Nos Quadros 4.3 e 4.4 são apresentados os valores das composições das argamassas e os resultados dos ensaios de início e fim de presa.

Quadro 4.3 – Composição das argamassas para a determinação dos tempos de presa (pasta de consistência normal).

Argamassa	Composição		
	Cimento (g)	Cinzas volantes (g)	Água (g)
AMP	500	-	154,0
AM1 (45% CV)	277,8	222,2	130,0
AM0 (50% CV)	250	250	128,0
AM2 (60% CV)	200	300	125,5

Quadro 4.4 – Tempos de presa das diversas argamassas.

Argamassa	Tempo início	Tempo fim presa
AMP	3h00	4h15
AM1 (45% CV)	4h00	5h15
AM0 (50% CV)	3h55	5h30
AM2 (60% CV)	5h05	6h30

Na Figura 4.2 mostra-se o equipamento e algumas das fases deste ensaio.



Figura 4.2 – Ensaio para determinação dos tempos de presa.

4.3.2.3. Discussão dos resultados

Para as argamassas em estudo, e em relação às afirmações de Malhotra e Ramezaniapour (1994), apresentadas em 2.2.3.1., pensa-se que apenas se aplica a afirmação respeitante à menor quantidade de água nas pastas com cinzas, uma vez que as cinzas volantes utilizadas não são da classe C, contém uma percentagem de SO_3 muito baixa (0,5%) e não foram utilizados adjuvantes.

Em relação às afirmações de Neville (1995), apresentadas na mesma secção, verifica-se que as argamassas com 45% e 50% de cinzas volantes têm efectivamente um atraso de cerca de uma hora relativamente à argamassa padrão. Este valor não é verificado para a argamassa com 60% de cinzas que apresenta um atraso de quase duas horas. Relativamente ao intervalo de tempo decorrido entre início e fim de presa foram obtidos valores bastante consistentes: 1h 15min para a argamassa de referência (AMP); 1h 15min para a argamassa com 45% de cinzas (AM1); 1h 35min para a argamassa com 50% de cinzas (AM0); e 1h 25min para argamassa com 60% de cinzas (AM2).

4.3.3. RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E À FLEXÃO

4.3.3.1. Descrição do ensaio

Nos ensaios para a determinação dos valores da resistência à compressão e à flexão foi seguida a norma NP EN 196-1 (1996). O ensaio de flexão foi realizado sobre provetes prismáticos de 40 x 40 x 160 mm³ e o ensaio de compressão nos meios provetes resultantes do ensaio de flexão. A amassadura de cada argamassa é feita nas condições especificadas na norma, após o que se enchem os moldes em duas camadas, compactando cada uma da forma indicada na mesma norma, sendo depois cobertos com uma placa de vidro e devidamente identificados e conservados à temperatura e humidade ambiente do laboratório ($T=20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $\text{HR} \geq 50\%$).

Foram preparados 18 provetes de cada argamassa para ensaiar aos 2, 7, 28, 60, 90 e 210 dias. Os provetes foram desmoldados às 24 horas e colocados imersos em água na câmara húmida à temperatura 20 ± 1 °C. Na Figura 4.3 apresentam-se as diversas fases da produção dos provetes.



Figura 4.3 – Fabrico dos provetes de argamassa.

Em primeiro lugar são efectuados os ensaios para a determinação da resistência à flexão (Figura 4.4), obtendo-se o valor da carga de rotura à flexão. Para cada argamassa e cada idade, são ensaiados 3 provetes. A carga de rotura pode ser obtida pela seguinte fórmula:

$$Rf = \frac{1,5Ff \times l}{b^3} \quad (4.1)$$

sendo:

- Rf, a resistência à flexão (MPa);
- Ff, a carga aplicada no centro do prisma na rotura (N);
- b, o lado da secção quadrada do prisma (mm);
- l, a distância entre apoios (mm), igual a 100 mm.



Figura 4.4 – Ensaio para determinação da resistência à flexão.

Os meios prismas resultantes do ensaio à flexão são depois ensaiados à compressão (Figura 4.5). Para cada um dos seis meios prismas determina-se a resistência à compressão através da fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4.2)$$

sendo:

- R_c , a resistência à compressão (MPa);
- F_c , a carga máxima na rotura (N);
- 1600, a área comprimida do provete (mm^2).

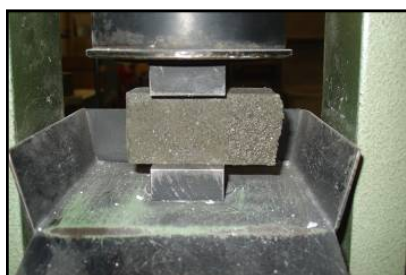


Figura 4.5 – Ensaio para determinação da resistência à compressão.

4.3.3.2. Apresentação dos resultados

No Quadro 4.5 e na Figura 4.6 são apresentados os valores obtidos para as resistências à compressão e o gráfico com a evolução das resistências ao longo do tempo. No Quadro 4.6 e na Figura 4.7 são apresentados os valores obtidos para as resistências à flexão e o gráfico com a evolução destas ao longo do tempo.

Quadro 4.5 – Resistências à compressão das argamassas.

Argamassa	Resistência à compressão [MPa]					
	Tempo					
	2 dias	7 dias	28 dias	61 dias	91 dias	210 dias
AMP	30,0	41,5	54,0	56,5	57,8	59,4
AM1 (45% CV)	17,6	26,6	41,0	45,5	49,4	59,0
AM0 (50% CV)	15,4	23,3	35,1	41,4	45,9	62,3
AM2 (60% CV)	12,0	18,2	28,9	35,2	40,6	50,5

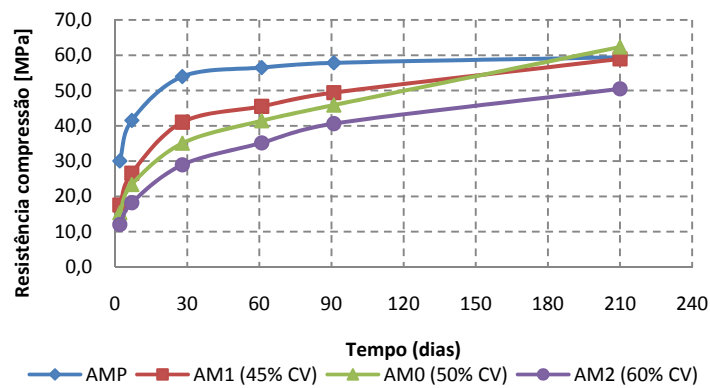


Figura 4.6 – Evolução da resistência à compressão das argamassas.

Quadro 4.6 – Resistências à flexão das argamassas.

Argamassa	Resistência à flexão [MPa]					
	Tempo					
	2 dias	7 dias	28 dias	61 dias	91 dias	210 dias
AMP	6,2	7,9	8,9	9,4	9,6	9,9
AM1 (45% CV)	4,1	5,9	7,6	8,6	9,3	10,7
AM0 (50% CV)	4,2	5,6	7,4	8,0	8,6	10,0
AM2 (60% CV)	3,0	4,1	5,9	6,9	7,5	8,8

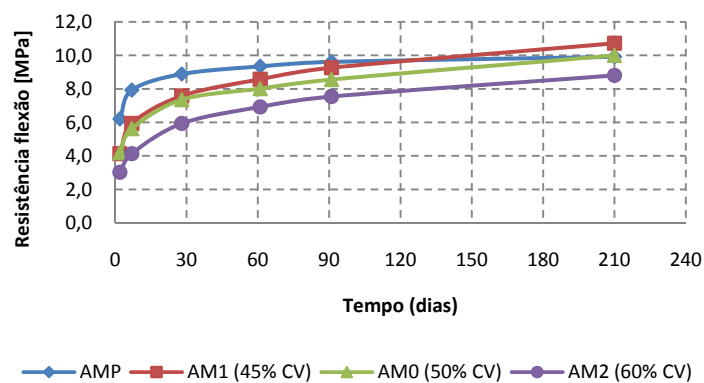


Figura 4.7 – Evolução da resistência à flexão das argamassas.

4.3.3.3. Discussão dos resultados

Para uma melhor visualização da evolução das resistências das argamassas foram elaboradas as Figuras 4.8 e 4.9 nas quais se apresenta a razão entre a resistência das argamassas com cinzas e da argamassa padrão, para cada idade, para a compressão e flexão, respectivamente.

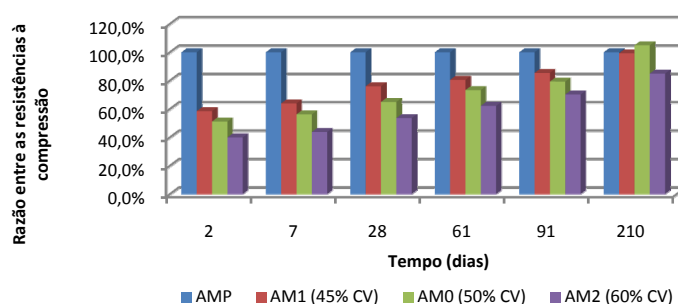


Figura 4.8 – Razão entre as resistências à compressão das argamassas com cinzas volantes e da argamassa padrão, para cada idade.

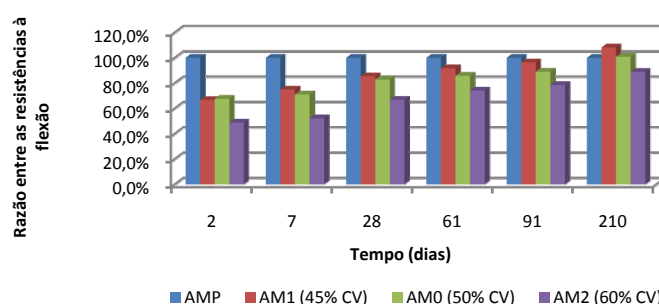


Figura 4.9 – Razão entre as resistências à flexão das argamassas com cinzas volantes e da argamassa padrão, para cada idade.

De um modo geral, as cinzas volantes contribuem para a diminuição das resistências mecânicas do betão nas primeiras idades. No entanto, a longo prazo os betões com cinzas volantes podem apresentar resistências semelhantes ou até mesmo superiores às determinadas em betões de controlo, sem adição de cinzas. Em virtude da reacção pozolânica ser lenta mas prolongada, verifica-se uma recuperação dos níveis de resistência nos betões com cinzas ao longo do tempo, caso a cura seja adequada, uma vez que a reacção pozolânica só ocorre na presença de água.

Ao analisar os resultados obtidos no presente trabalho, apesar de se tratar de argamassas e não de betão, verifica-se que, tal como nos betões, as resistências iniciais das argamassas com cinzas são inferiores em relação à argamassa padrão. O facto de se ter elevadas percentagens de substituição torna ainda mais evidente o lento desenvolvimento de resistência, especialmente nas primeiras idades.

No entanto as argamassas com teores de 45% e 50% de cinzas volantes apresentam a longo prazo (sete meses) resistências iguais ou superiores à argamassa de referência, enquanto que as resistências da argamassa com 60% de cinzas são ainda inferiores, para a mesma idade, em cerca de 15% da argamassa padrão.

Verifica-se que o crescimento das resistências, relativamente à argamassa padrão, é menor nas resistências à compressão do que nas resistências à flexão, facto já observado em argamassas com menores percentagens de substituição (Mota Miranda, 2006).

A partir dos 28 dias e até ao último ensaio realizado (aos sete meses), é notória a evolução da resistência das argamassas com cinzas volantes, virtude do contínuo processo de hidratação das cinzas, que como se refere na secção 2.2.3.2., segundo Fraay *et al*, (1989), ao fim de um ano a quantidade de cinzas que ainda não reagiu pode ascender a 50%.

Face aos resultados obtidos e, tendo em conta que o objectivo destas argamassas é a reparação de estruturas de betão, mesmo as resistências evidenciadas nas primeiras idades são suficientes para cumprirem, do ponto de vista das resistências mecânicas, a finalidade a que se destinam.

4.3.4. RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO

4.3.4.1. Descrição do ensaio

O desgaste pode definir-se como a saída não propositada de material sólido de uma dada superfície, sendo a sua natureza muito complexa e por isso não havendo um método geral que permita determinar a grandeza do desgaste.

A resistência ao desgaste que interessa considerar para o estudo das argamassas do presente trabalho é a resistência ao desgaste por abrasão, que pode ser determinada por diferentes métodos. Contudo, na maioria dos ensaios mede-se a profundidade do desgaste, perda de espessura, ou a perda de massa do provete, avaliando-se apenas a resistência da camada superficial do material.

A resistência ao desgaste por abrasão é determinada segundo o método de ensaio descrito na especificação LNEC E 396 (1993), numa máquina de Amsler-Laffon para ensaios de desgaste, que consiste em submeter a um percurso de 200 m, placas quadradas de argamassa, de 60 mm de lado e 25 mm de espessura, comprimidas, por uma força de 333N, de encontro a um disco metálico em rotação, com interposição de areia siliciosa. O resultado do ensaio é a diferença na espessura da placa, medida antes e após o ensaio.

Realizaram-se quatro ensaios para cada argamassa, à excepção da argamassa com 45% de cinzas onde, por inutilização de um provete, apenas se realizaram três. As placas foram obtidas por corte de dois cubos de 10 cm de aresta, conservados até à data do ensaio em câmara com temperatura e humidade controlada ($T = 20 \pm 2$ °C e $HR \geq 90\%$). À data de ensaio os provetes apresentavam a idade de aproximadamente 100 dias.

4.3.4.2. Apresentação dos resultados

Os resultados do ensaio, realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), apresentam-se no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Valores médios da resistência ao desgaste por abrasão.

Argamassa	Desgaste (mm)
AMP	0,8
AM1 (45% CV)	0,7
AM0 (50% CV)	0,9
AM2 (60% CV)	1,0

4.3.4.3. Discussão dos resultados

Os resultados mostram não haver uma diferença significativa entre os valores obtidos para as diversas argamassas, estando de acordo com a bibliografia consultada e apresentada no Capítulo 2.

4.3.5. ADERÊNCIA – ENSAIO DE CORTE

4.3.5.1. Descrição do ensaio

Para que as argamassas de reparação apresentem um desempenho satisfatório, é essencial a sua adesão ao substrato de betão.

Apresenta-se no Quadro 4.8 a composição do betão utilizado para verificar a aderência da argamassa. Este betão apresentou aos 28 dias uma resistência à compressão de 39 MPa.

Quadro 4.8 – Composição do betão de controlo.

Componente	Quantidade
Cimento	450 kg/m ³
Brita grande	545 kg/m ³
Brita pequena	535 kg/m ³
Areia grossa	350 kg/m ³
Areia fina	400 kg/m ³
Água	225 l/m ³

De modo a quantificar a aderência das argamassas ao betão recorre-se a uma máquina de corte, que permite ensaiar provetes prismáticos de 195 x 200 x 150 mm³. Cada provete é constituído por uma camada de betão com 75 mm de altura e por uma camada de argamassa também com 75 mm de altura. Dada a indisponibilidade, na altura do ensaio, dos moldes cúbicos com 20 cm de lado, os provetes foram realizados recorrendo a moldes prismáticos com 20 x 20 x 70 cm³.

Para a argamassa padrão e para as argamassas com 45% e 50% de cinzas encheram-se os referidos moldes (um por cada argamassa), em primeiro lugar, com o betão até à altura de 75 mm (Figura 4.10). Ao fim de sete dias colocou-se a argamassa em cima do betão até perfazer os 150 mm de altura do provete, molhando-se apenas a superfície do betão.



Figura 4.10 – Colocação do betão nos moldes até 75 mm de altura.

Ao fim de 28 dias, após a colocação da argamassa, cortaram-se dois provetes por argamassa, com as dimensões de ensaio. Não foi realizado qualquer provete para a argamassa com 60% de cinzas

volantes, visto ser um ensaio dispendioso. Os provetes apresentavam à data de ensaio uma idade de cerca de dois meses.

A máquina de corte possui uma caixa constituída por duas metades com $200 \times 200 \times 75 \text{ mm}^3$, na qual o provete é colocado. A parte inferior da caixa é móvel, permitindo solicitar o provete segundo a superfície de separação dos dois materiais, que se encontra à altura de 75 mm.

Na Figura 4.11 ilustram-se algumas imagens da referida máquina.

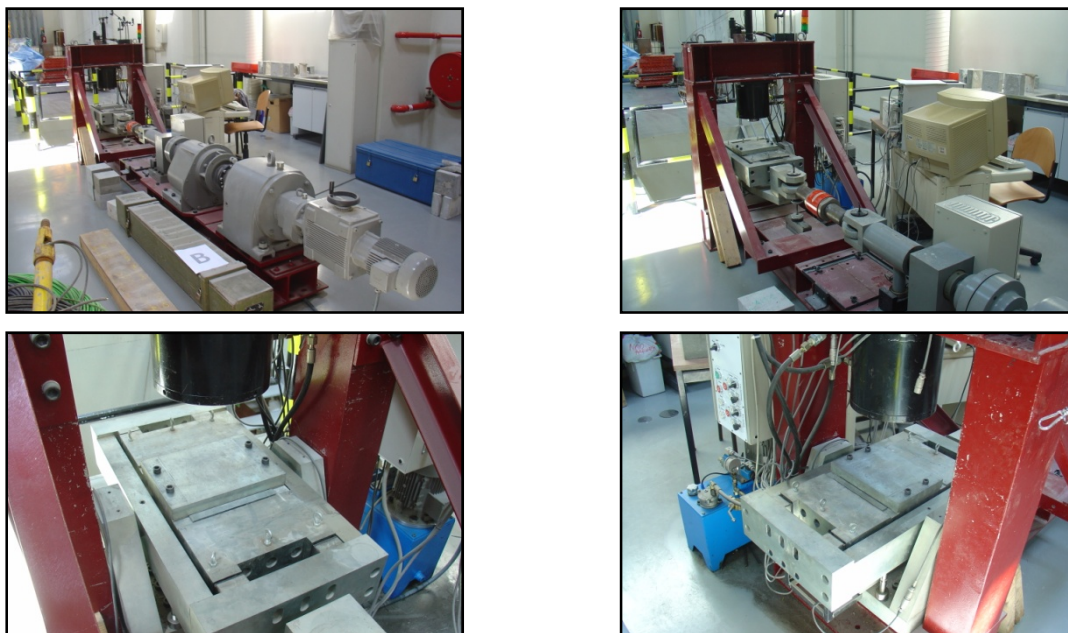


Figura 4.11 – Máquina para o ensaio de corte.

4.3.5.2. Apresentação dos resultados

Na Figura 4.12 apresentam-se algumas imagens dos provetes no final do ensaio.

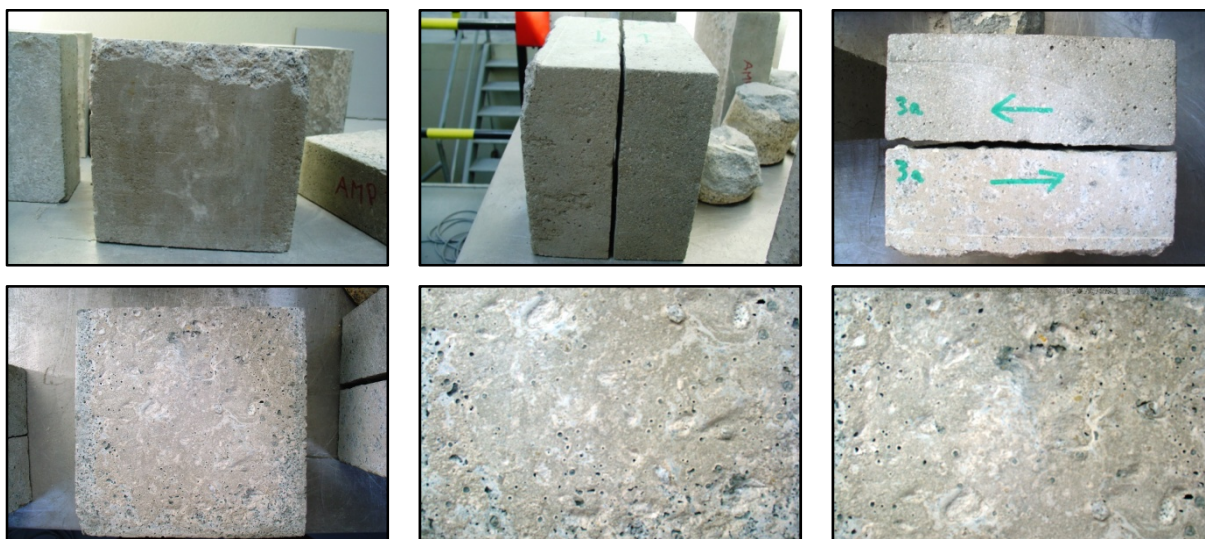


Figura 4.12 – Provetes depois de serem ensaiados.

Nas Figuras 4.13 a 4.15 apresentam-se as curvas médias da tensão de corte em função do tempo, para as argamassas AMP, AM1 (45% CV) e AM0 (50% CV), respectivamente.

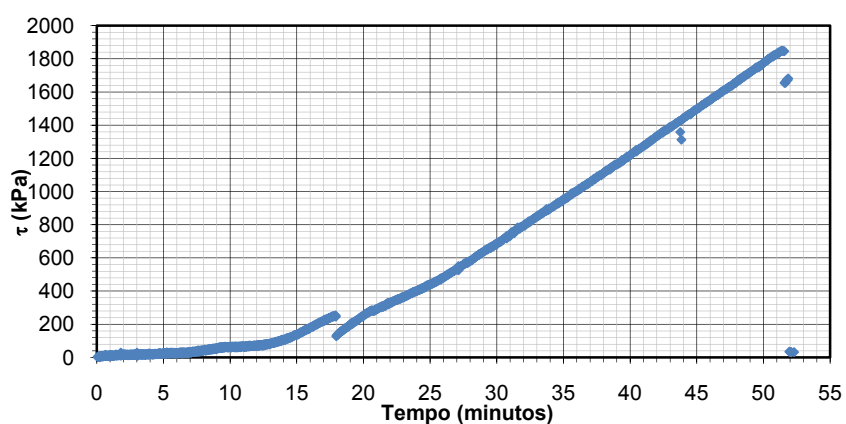


Figura 4.13 – Tensão de corte para a argamassa padrão.

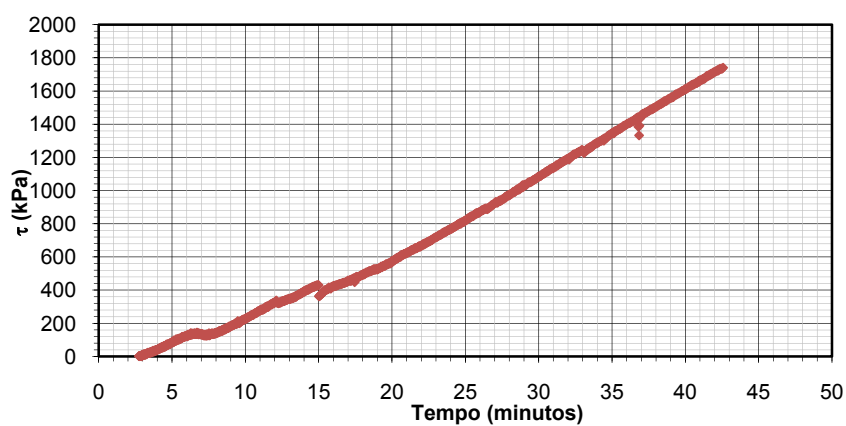


Figura 4.14 – Tensão de corte para a argamassa AM1 (45% CV).

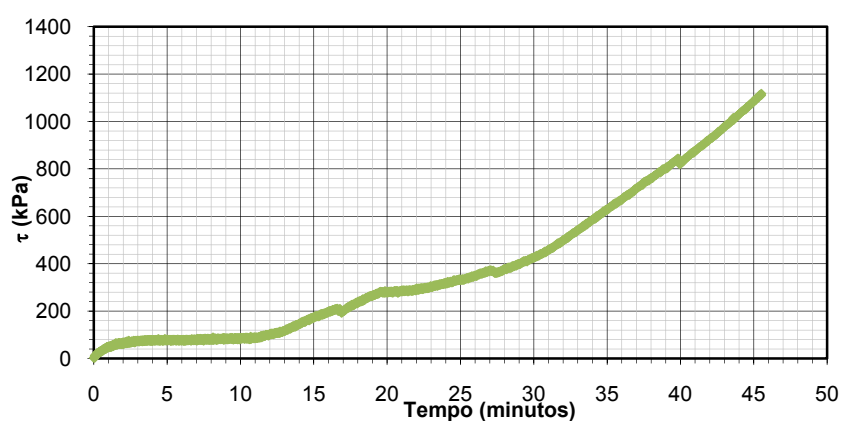


Figura 4.15 – Tensão de corte para a argamassa AM0 (50% CV).

4.3.5.3. Discussão dos resultados

Nos ensaios de corte de todas as argamassas, verifica-se uma primeira cedência para valores compreendidos entre 0,2 MPa e 0,4 MPa, correspondendo a deslocamentos entre 2,5 mm e 3,2 mm. No entanto, a separação dos dois materiais só ocorre para valores entre 1,1 MPa e 1,9 MPa.

Nos provetes de todas as argamassas apesar de a rotura se dar, essencialmente, pela junta, observam-se agregados grossos do betão fracturados (Figura 4.16).



Figura 4.16 – Superfície de rotura.

Estes resultados apenas nos permitem tirar conclusões qualitativas, no sentido em que as argamassas com cinzas (45% e 50%) têm um comportamento idêntico à argamassa padrão.

4.3.6. POROSIDADE LIVRE

4.3.6.1. Descrição do ensaio

Um dos factores fundamentais que influi de forma decisiva na durabilidade das argamassas é a sua estrutura porosa, uma vez que a deterioração das argamassas é muito afectada pelo transporte de gases e líquidos, com ou sem substâncias em solução ou suspensão. A maior ou menor facilidade deste transporte depende basicamente da estrutura porosa da argamassa e das condições ambientais na sua superfície.

O conjunto de poros é constituído poros interligados, poros isolados e por cegos ou mortos (Buil e Ollivier, 1992), nem todos contribuindo de igual modo na circulação dos fluidos.

Diferentes grandezas relacionadas com estas famílias de poros são por vezes definidas, no entanto a porosidade livre ou acessível é uma grandeza muitas vezes apresentada na caracterização do meio poroso.

A transferência de fluidos nas argamassas depende também da porometria, isto é, da distribuição do tamanho dos poros (Mertz, 1991).

O estudo da porometria de meios porosos requer o emprego de várias técnicas, cada uma com o seu campo preciso de aplicação, devido à grande gama da dimensão e geometria dos poros e das suas interligações, sendo a mais utilizada, e actualmente a única disponível em Portugal, a do porosímetro de mercúrio. No entanto, Mota Miranda (2006) verificou que a definição da porometria das argamassas com cinzas volantes não pode ser efectuada por este método devido à elevada quantidade de poros de dimensões reduzidas não quantificadas, razão pela qual não é caracterizada neste trabalho.

Os ensaios da porosidade livre, aberta ou às 48 horas são ensaios, que demoram 48 horas à pressão atmosférica, permitindo apenas o preenchimento dos poros livremente acessíveis à água em condições normais de embebição ou imersão. Na realização dos ensaios seguiu-se a metodologia proposta pelo Laboratoire de Pétrophysique du Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg (Mertz, 1991; Hammecker, 1993).

Para este ensaio foram utilizados doze provetes prismáticos de cada argamassa, divididos em dois grupos: seis provetes com dimensão $40 \times 40 \times 45 \text{ mm}^3$ (provetes 1 a 6) e seis provetes com dimensão $40 \times 40 \times 30 \text{ mm}^3$ (provetes 7 a 12). Cada grupo de doze provetes foi obtido pelo corte de três provetes moldados, com dimensão $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, e provenientes de uma única amassadura. Os provetes com 45 mm de altura foram ensaiados assentes numa superfície serrada, enquanto que os provetes de 30 mm foram ensaiados assentes numa superfície moldada.

Os mesmos provetes foram ainda usados nos ensaios de absorção de água por capilaridade e de evaporação.

À data de início do ensaio os provetes apresentavam uma idade de 170 dias, tendo sido mantidos até aos 90 dias em câmara com humidade e temperatura controlada ($T = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ e $HR \geq 90\%$).

Os provetes foram secos em estufa a 60°C , até peso constante (W_0), o que corresponde a uma variação máxima de 0,1% da massa entre pesagens consecutivas e depois colocados sobre uma grelha no interior de caixas, tendo-se introduzido água destilada, durante uma hora, até um quarto da sua altura. Após a primeira hora de ensaio é acrescentada água destilada até se atingir metade da altura dos provetes, mantendo-se estas condições durante mais 23 horas. Finalmente, depois das primeiras 24 horas de ensaio, é adicionada água destilada até se atingir uma altura aproximada de 2 cm acima do topo dos provetes. Ao fim das 48 horas do ensaio, os provetes são pesados, obtendo-se o peso W_{48} .

Durante o ensaio os provetes foram conservados em caixas hermeticamente fechadas e com temperatura e humidade relativa controladas.

Sendo V , o volume do provete, a porosidade livre (N_{48}) é determinada pela seguinte expressão:

$$N_{48} = (W_{48} - W_0) / V \quad (4.3)$$

Para a determinação das dimensões de cada provete foi utilizado um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. Na Figura 4.17 apresentam-se algumas imagens do ensaio.



Figura 4.17 – Ensaio para determinação da porosidade livre.

4.3.6.2. Apresentação dos resultados

Os resultados obtidos neste ensaio são apresentados no Quadro 4.9. Na primeira coluna é identificada a argamassa e a altura dos seis provetes, na segunda coluna mostra-se a média dos provetes com a mesma altura e na última coluna a média de todos os provetes.

Quadro 4.9 – Porosidade livre dos provetes de argamassa.

Argamassa	N_{48} (%)	
AMP (45 mm de altura)	13,66	13,53
AMP (30 mm de altura)	13,40	
AM1 (45% CV) (45 mm de altura)	8,43	8,35
AM1 (45% CV) (30 mm de altura)	8,64	
AM0 (50% CV) (45 mm de altura)	8,23	8,27
AM0 (50% CV) (30 mm de altura)	8,31	
AM2 (60% CV) (45 mm de altura)	9,02	9,30
AM2 (60% CV) (30 mm de altura)	9,85	

Para cada argamassa, a média foi calculada inicialmente com todos os valores e depois foram excluídos os valores que apresentavam um desvio superior a 10% em relação à média, sendo esta em seguida recalculada.

4.3.6.3. Discussão dos resultados

No Quadro 4.9, para cada argamassa estão presentes dois valores para a porosidade livre. Com isto pretendeu-se avaliar se existe alguma diferença entre os provetes de 45 mm e de 30 mm de altura. Verifica-se que as diferenças são da ordem de grandeza do erro do ensaio, o que quer dizer que o volume envolvido nos provetes com 30 mm de altura é já representativo do ensaio.

Os provetes 1 a 6 foram ensaiados, como se referiu, com uma das faces serradas voltada para baixo e os provetes 7 a 12 com uma das faces moldadas voltada para baixo. Comprovou-se, como era de prever, que este factor não tem influência no ensaio, uma vez que este ensaio envolve todo o volume do provete.

Os resultados mostram uma diferença muito grande entre as porosidades da argamassa padrão e as porosidades das argamassas com cinzas volantes. As argamassas com cinzas volantes apresentam uma porosidade bastante menor que a argamassa de controlo. Destas, a argamassa com 60% de cinzas é a que mostra maior porosidade, apresentando as outras duas (45% e 50% de cinzas) valores muito semelhantes.

Os resultados obtidos para a porosidade livre são coerentes com os resultados para a absorção de água por capilaridade, apresentados em 4.3.7, uma vez que também neste ensaio foram as argamassas AM1 (45% CV) e AM0 (50% CV) que absorveram menores quantidades de água, seguidas pelas argamassas AM2 (60% CV) e AMP, respectivamente.

Como seria de esperar e, de acordo com a revisão bibliográfica, apresentada em 2.2.3.3. as argamassas com cinzas volantes apresentaram menores valores de porosidade livre do que a argamassa padrão. Por um lado, a menor quantidade de água que estas contêm contribui para uma estrutura mais densa, logo menos porosa. Por outro lado, a utilização de cinzas volantes conduz a uma reestruturação da rede porosa levando à diminuição do tamanho dos poros devido à simultaneidade da sua reacção pozolânica com a hidratação do cimento. Concomitantemente, verifica-se uma diminuição no volume dos poros, fruto do efeito físico e pozolânico das cinzas volantes. Através deste processo, a permeabilidade da pasta de cimento hidratada, bem como a porosidade da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado são reduzidas.

No caso da argamassa AM2 (60% CV) obtivemos uma maior porosidade livre do que nas argamassas AM1 (45% CV) e AM0 (50% CV), apesar de a primeira possuir a menor razão $A/(C+CV)$. Uma explicação para tais resultados poderá residir no facto de uma percentagem tão elevada de cinzas necessitar de um maior tempo de hidratação de modo a permitir a reestruturação da sua rede porosa, levando à diminuição do tamanho dos seus poros.

4.3.7. ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

4.3.7.1. Descrição do ensaio

A ausência de ligações químicas entre os poros e as moléculas mais próximas, faz com que estes possuam uma energia latente na sua superfície livre, tanto maior quanto maior for a superfície específica dos mesmos. A absorção de água por capilaridade é a penetração de um líquido na argamassa por acção desta tensão superficial, que actua nos seus poros capilares.

A absorção de água por capilaridade traduz-se na capacidade que os materiais porosos têm de captar água acima do nível que apresenta a superfície líquida em contacto com eles.

Para as argamassas de reparação esta é uma propriedade fundamental, uma vez que é por capilaridade que penetram, por exemplo, as águas da chuva e do nível freático do solo.

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado segundo a metodologia proposta pelo Laboratoire de Pétrophysique do Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg (Mertz, 1991; Hammecker, 1993).

Utilizaram-se os mesmos provetes do ensaio da porosidade livre (descritos em 4.3.6.1). Nos provetes com 45 mm de altura a água penetrou por uma superfície serrada, enquanto que nos provetes de 30 mm a penetração de água deu-se através de uma superfície moldada. O ensaio foi realizado em provetes com 90 dias de idade, tendo sido conservados até ao início do ensaio em câmara com humidade e temperatura controlada ($T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$ e $HR \geq 90\%$).

Em primeiro lugar, os provetes foram secos em estufa a 60°C , até massa constante, o que corresponde a uma variação máxima de 0,1% da massa entre pesagens consecutivas. Seguidamente, colocaram-se os provetes na vertical sobre uma grelha no interior de quatro caixas de plástico (uma por argamassa, para cada conjunto de doze provetes). Foi introduzida água destilada nas caixas de modo a perfazer uma altura de cerca de 2 mm acima da base dos provetes. A altura da água foi mantida constante durante o ensaio, sendo as caixas hermeticamente fechadas e com temperatura e humidade relativa controladas ($T = 20^\circ\text{C}$ e $HR \approx 100\%$).

A caracterização da absorção de água por capilaridade realizou-se acompanhando a progressão do peso dos provetes em intervalos de tempo crescentes. Não foi feita a medição da altura da franja capilar dada a sua irregularidade. As medições foram efectuadas até o peso dos provetes estabilizar.

Na Figura 4.18 são apresentadas algumas imagens referentes à realização deste ensaio.

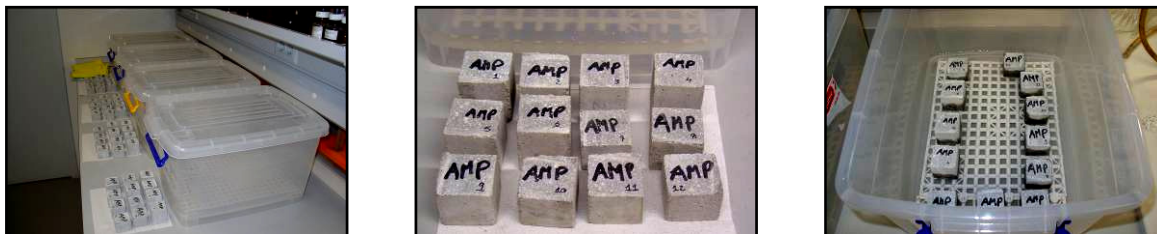


Figura 4.18 – Ensaio de absorção de água por capilaridade.

4.3.7.2. Apresentação dos resultados

Faz-se a caracterização gráfica do ensaio, representando, em ordenadas, o aumento do peso dos provetes por unidade de superfície devido à absorção de água e, em abcissas, a raiz quadrada do tempo.

As curvas obtidas para cada argamassa são representadas na Figura 4.19. Está bem patente, para todas as argamassas, a presença de duas famílias de curvas, uma para os provetes de 45 mm de altura e outra para os de 30 mm.

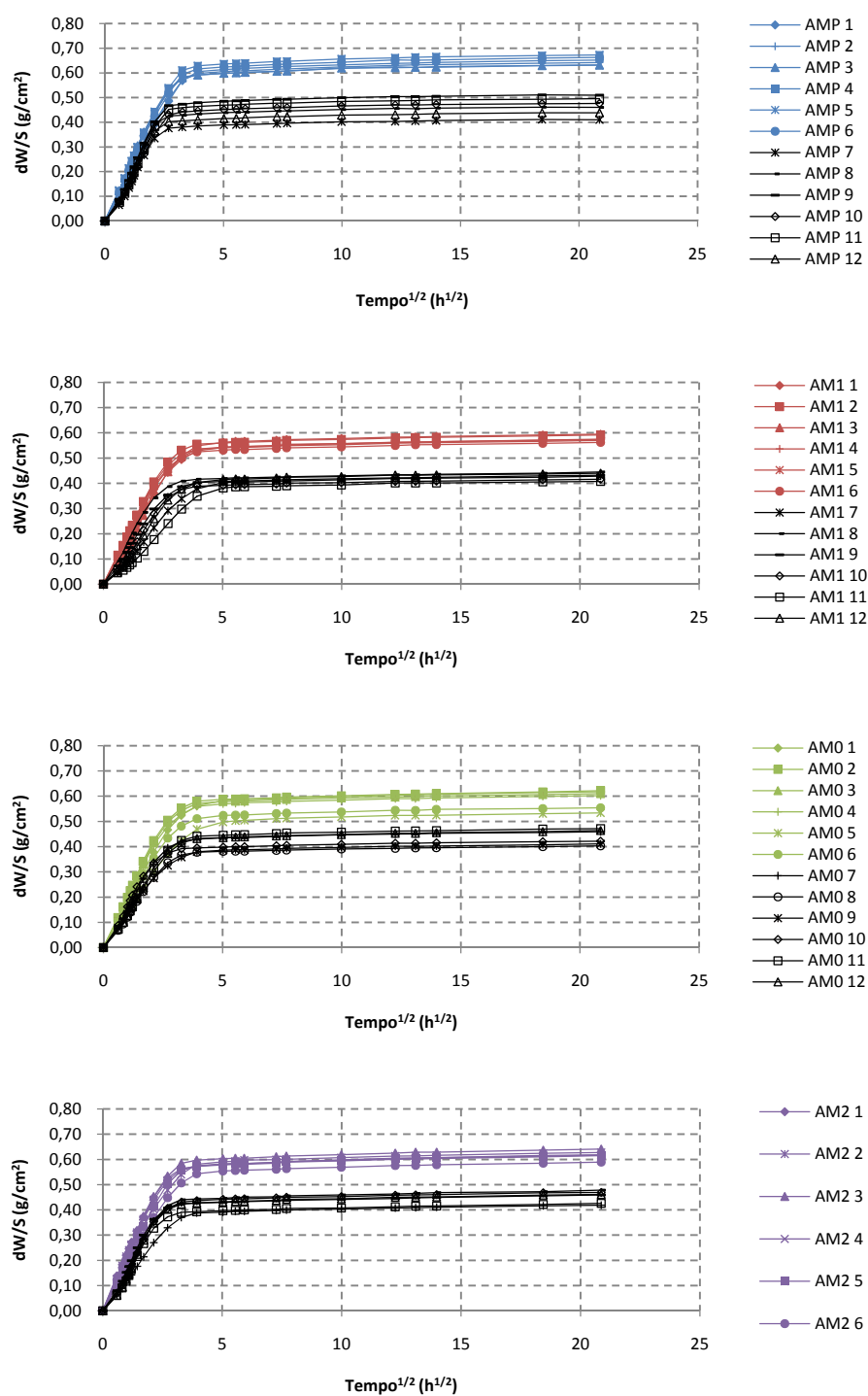


Figura 4.19 – Curvas de absorção de água por capilaridade para cada uma das argamassas.

Na Figura 4.20 é feita a comparação entre as curvas médias obtidas para cada argamassa, representando I os provetes com 45 mm de altura e II os provetes com 30 mm de altura.

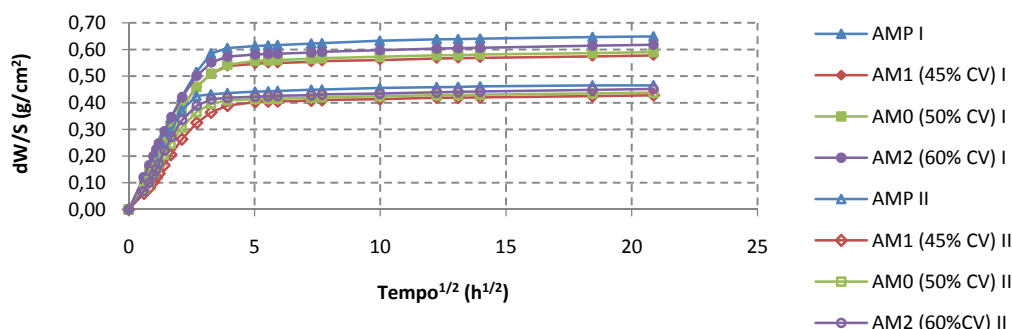


Figura 4.20 – Curvas médias de absorção de água por capilaridade para cada uma das argamassas.

4.3.7.3. Discussão dos resultados

As curvas que caracterizam a absorção de água por capilaridade, representando o aumento de peso por unidade de superfície e por raiz quadrada do tempo, são constituídas por dois segmentos rectilíneos, indicando a intersecção destes segmentos o tempo que a franja capilar demora a atingir a superfície do topo do provete. O declive do primeiro segmento de recta representa o coeficiente de absorção de água.

A análise dos gráficos das Figuras 4.19 e 4.20 mostra, para todas as argamassas, em primeiro lugar, uma separação nítida em duas famílias de curvas. Esta separação distingue os provetes com 45 mm de altura dos de 30 mm. Para além da diferente altura, também a superfície de penetração da água é diferente, serrada nos primeiros provetes e moldada nos últimos.

Assim, em todas as argamassas os provetes com 30 mm de altura apresentaram um menor aumento de peso por unidade de superfície e ainda uma menor velocidade de absorção capilar, traduzida pelo menor declive da recta inicial.

Todas as argamassas com cinzas exibem uma menor velocidade de absorção e quantidade de água absorvida por unidade de superfície do que a argamassa padrão. De todas, a argamassa AM1 (45% CV) foi a que teve o menor aumento de massa por unidade de área e a que apresentou menor velocidade de absorção, sendo seguida pelas argamassas AM0 (50% CV), AM2 (60% CV) e, finalmente, a argamassa padrão. Esta ordenação verificou-se em ambas as famílias de provetes.

Como referido em 2.2.3.3., há consenso entre os diversos autores em que a utilização de cinzas volantes contribui para a redução do tamanho dos poros. Se apenas se considerar o tamanho dos poros, as curvas de absorção de água por capilaridade aparentemente contrariam esta teoria, uma vez que a velocidade de absorção de água por capilaridade é inversamente proporcional ao tamanho dos poros e a curva com maior velocidade é a da argamassa padrão. No entanto, estas curvas não podem ser analisadas sem considerar a enorme diminuição do volume de poros das argamassas com cinzas em relação à argamassa de controlo. Assim, estas curvas traduzem apenas que o efeito desta diminuição prevalece sobre o efeito da redução do tamanho dos poros.

Analisando as argamassas com cinzas volantes, verifica-se também que as que devem ter menores tamanhos de poros são as que mais lentamente absorvem a água. No entanto, para estas argamassas, além do valor da porosidade é também necessário considerar que a reacção pozolânica é

lenta e que a rede porosa pode ainda sofrer um refinamento para idades superiores às da realização do ensaio (90 dias). Por último, e em especial na argamassa com 60% de cinzas, a reacção pozolânica pode não ser completa, devido a uma possível quantidade insuficiente de hidróxido de cálcio, dada a pequena dosagem de cimento. Estas afirmações podem justificar o facto de a argamassa AM2 (60% CV) ter apresentado uma maior velocidade de absorção de água e maior quantidade de água absorvida por unidade de área do que as argamassas AM1 (45% CV) e AM0 (50% CV). As diferenças de valores entre estas duas últimas argamassas são da ordem de grandeza do erro do ensaio.

A menor resistência apresentada pela argamassa AM2 (60% CV) vem reforçar as anteriores afirmações.

Para melhor se compreender a influência do tipo de superfície ensaiada, moldada ou serrada, e da altura dos provetes nos resultados, compararam-se os valores para a argamassa padrão, AMP, com os obtidos por Miranda (2006). Esta comparação é possível na medida em que as argamassas de referência de ambos os trabalhos apresentam a mesma composição e o mesmo tipo de cimento utilizado (CEM I – 42,5R), verificando-se, apenas, uma ligeira variação na quantidade de água utilizada (217,1 g neste trabalho e 220 g na referida dissertação). Na Figura 4.21 são apresentadas as curvas médias de absorção obtidas para as argamassas padrão de ambas as dissertações. No trabalho efectuado por Mota Miranda (2006), todos os provetes apresentavam 45 mm de altura e a mesma secção de 40 x 40 mm² utilizada no presente ensaio.

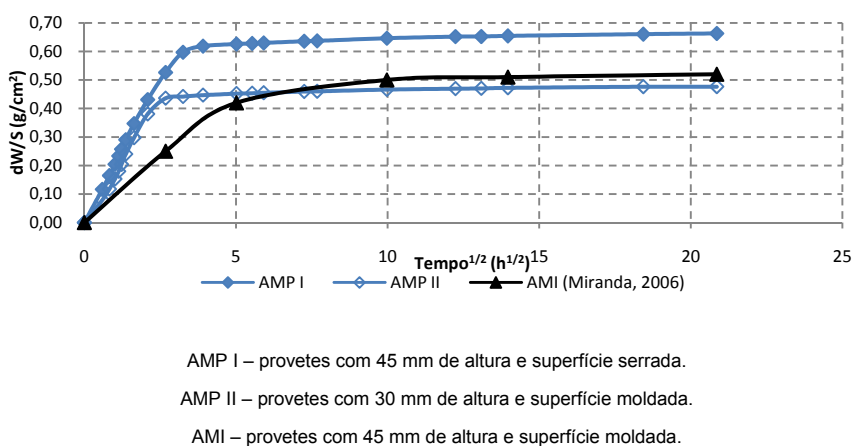


Figura 4.21 – Comparação entre as curvas médias das argamassas padrão para o ensaio de absorção capilar do presente trabalho e de Mota Miranda (2006).

Comparando as curvas AMP II e AMI, ambas em provetes com superfície moldada, diferindo apenas na altura (45mm para AMI e 30mm para AMP II), constata-se que a divergência de resultados reside essencialmente na velocidade de absorção capilar. É notório que a recta inicial da curva AMI apresenta um declive consideravelmente menor do que o da curva AMP II, embora a quantidade total de água absorvida por unidade de área seja muito idêntica. Este facto indicia que a altura de 30 mm para o provete não é suficiente para obter resultados significativos. Efectivamente, Ramos (2001) indica que a altura do provete não deve ser inferior a 40 mm, facto que se conhecia, mas aproveitou-se a oportunidade de se terem sobras de provetes com 30 mm de altura para confirmar esta conclusão desse trabalho.

Comparando agora as curvas AMP I e AMI, referentes a provetes com as mesmas dimensões, diferindo apenas a superfície de ensaio, verifica-se que a superfície serrada (AMP I) conduziu a uma

velocidade de absorção bastante mais elevada do que a superfície moldada (AMI) e ainda a um aumento de peso por unidade de área consideravelmente superior. De facto, o efeito de parede verificado nas superfícies moldadas leva a uma maior compacidade, ou menor porosidade dessa camada superficial, podendo explicar os resultados obtidos.

Dadas as diferenças encontradas em relação ao trabalho de Mota Miranda (2006), foi repetido o ensaio de absorção de água por capilaridade e determinados os coeficientes de absorção. Os provetes com 45 mm de altura foram desta vez ensaiados com a entrada de água por uma das superfícies moldadas. Assim, a superfície de ensaio passou a ser de $40 \times 45 \text{ mm}^2$ e a altura de 40 mm.

O coeficiente de absorção, representado pelo declive da recta inicial do ensaio de absorção de água por capilaridade, foi determinado utilizando os dados do ensaio correspondentes a um período de quatro horas, desprezando as primeiras leituras devido ao pequeno aumento de massa (Neville, 1995) e, ajustando os valores obtidos por uma recta. Na Figura 4.22 e 4.23 são apresentados os gráficos com os coeficientes de absorção dos provetes para três situações distintas: penetração de água por uma superfície serrada e provetes com 45 mm de altura e penetração de água por uma superfície moldada e provetes com 30 mm e 40 mm de altura. Na Figura 4.22 apresentam-se os resultados globais, enquanto que na Figura 4.23 se ilustram, para facilitar a interpretação dos resultados, os valores médios para cada argamassa.

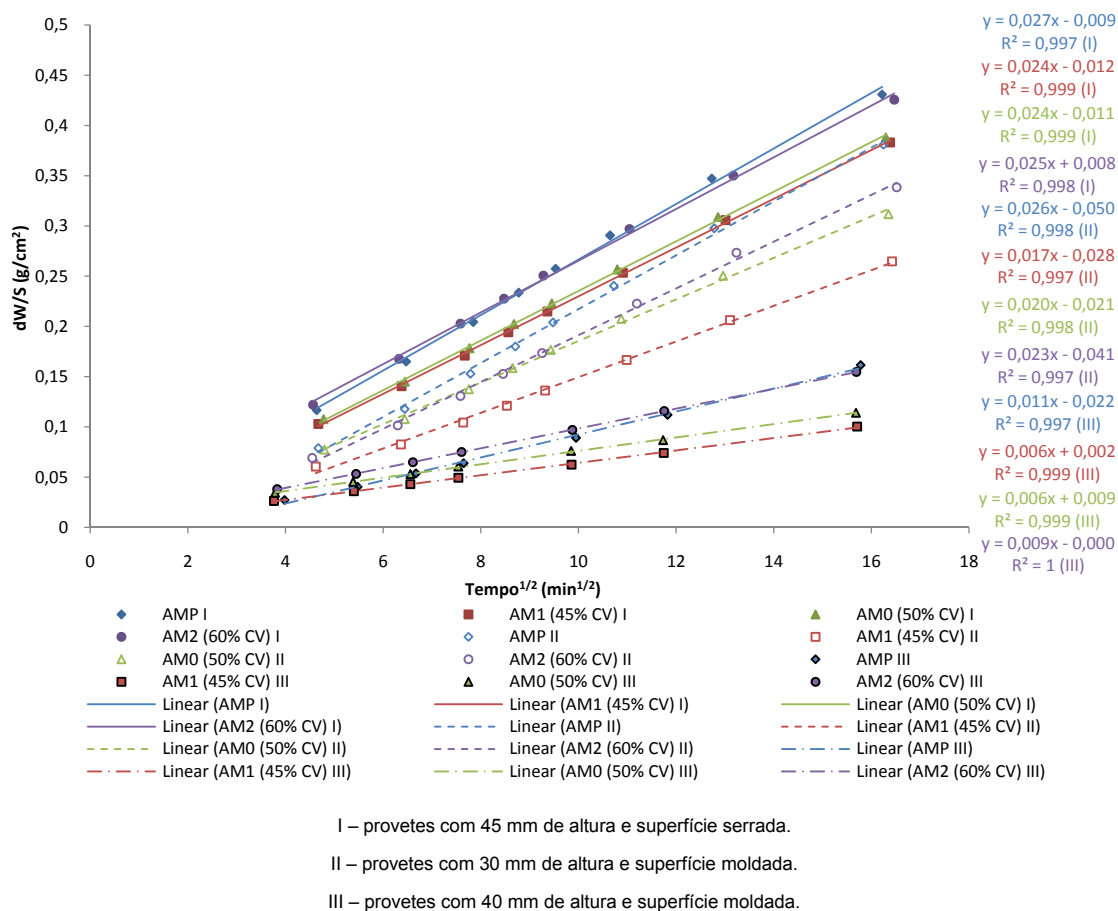
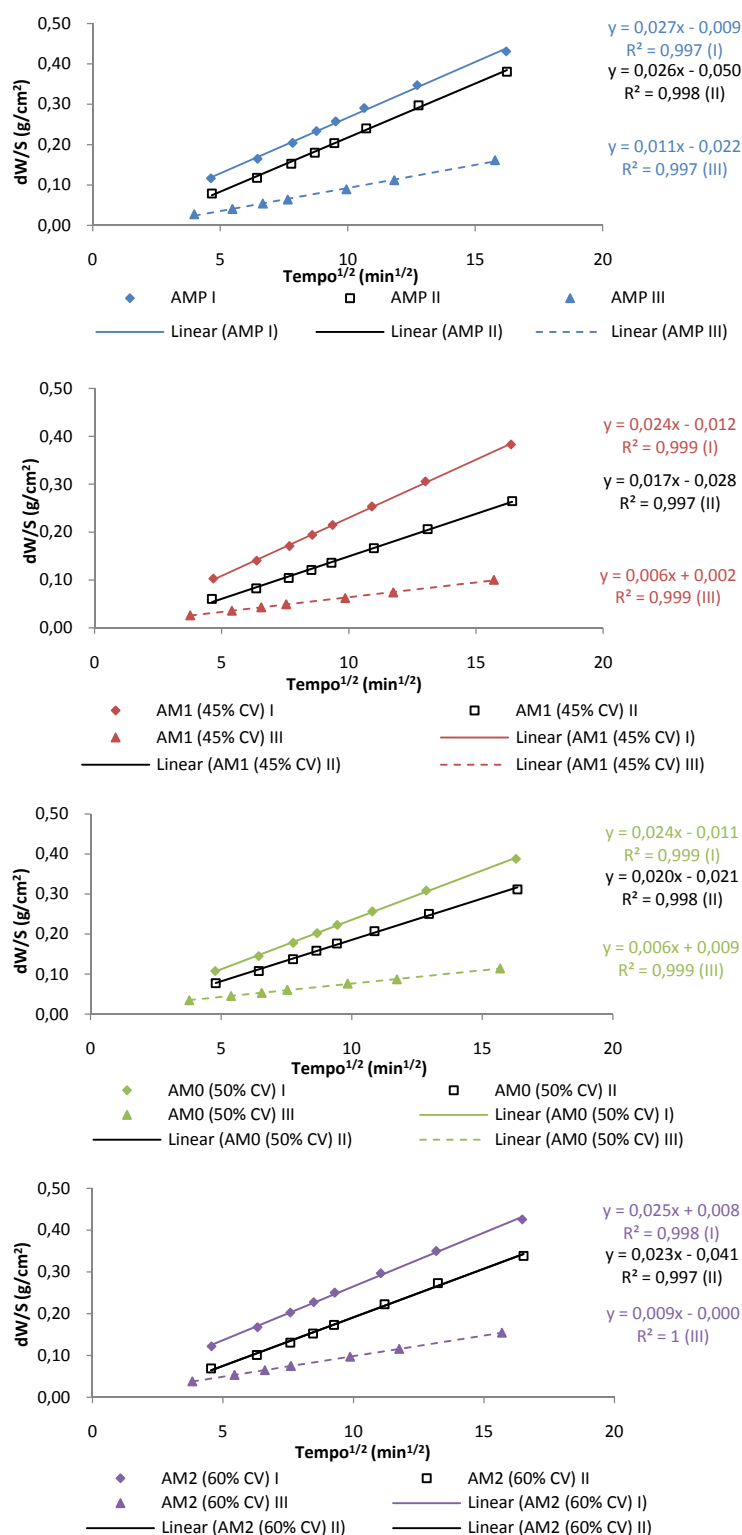


Figura 4.22 – Coeficientes de absorção de todas as argamassas.



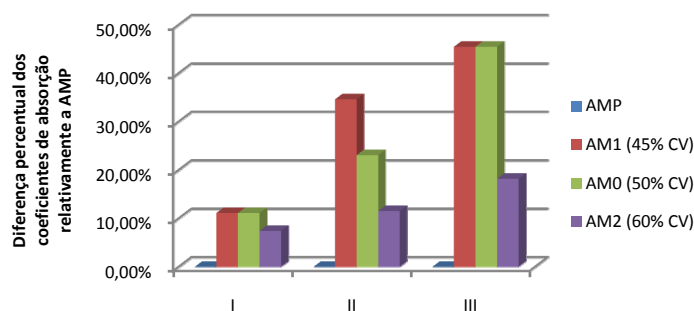
I – provetes com 45 mm de altura e superfície serrada.

II – provetes com 30 mm de altura e superfície moldada.

III – provetes com 40 mm de altura e superfície moldada.

Figura 4.23 – Coeficientes de absorção para cada uma das argamassas.

Na Figura 4.24 mostra-se a diferença percentual entre os coeficientes de absorção das argamassas com cinzas, relativamente à argamassa padrão.



I – provetes com 45 mm de altura e superfície serrada.

II – provetes com 30 mm de altura e superfície moldada.

III – provetes com 40 mm de altura e superfície moldada.

Figura 4.24 – Diferença percentual dos coeficientes de absorção relativamente a AMP, para cada conjunto de provetes.

Os resultados obtidos com a análise dos coeficientes de absorção mostram que o tipo de superfície ensaiada e a altura dos provetes influenciam os resultados obtidos.

A interpretação dos resultados destes ensaios, conjuntamente com os resultados obtidos por Mota Miranda (2006), permite concluir que em provetes com altura superior a 40 mm, apenas o tipo de superfície por onde a água penetra, conduz a resultados diferentes. Calculou-se, para a argamassa padrão (com 45 mm de altura) do trabalho de Mota Miranda (2006), o coeficiente de absorção, tendo-se obtido o valor de $0,01 \text{ g}/(\text{cm}^2 \times \text{min}^{0,5})$, muito semelhante ao da argamassa comparável do presente trabalho, para a qual se obteve o valor de $0,011 \text{ g}/(\text{cm}^2 \times \text{min}^{0,5})$.

Os menores coeficientes de absorção mostram que as cinzas volantes tornam as argamassas mais compactas.

A maior diferença percentual entre os coeficientes de absorção das argamassas com cinzas e da argamassa padrão verificou-se para os provetes com 40 mm de altura e superfície moldada (Figura 4.24).

4.3.8. ENSAIO DE EVAPORAÇÃO

4.3.8.1. Descrição do ensaio

Os ensaios de evaporação estão intimamente ligados com os ensaios de caracterização do meio poroso, embora não sirvam para a sua quantificação. A secagem dos materiais porosos é um processo complexo no qual intervêm, além das características do material, múltiplos factores que é necessário controlar, dos quais se destacam a temperatura e a humidade relativa do ar (Begonha, 2001), sendo a primeira facilmente controlada. A humidade relativa é também fácil de controlar desde que se utilizem caixas hermeticamente fechadas com soluções sobressaturadas de determinados sais, tais como, por exemplo, o nitrato de potássio e o cloreto de sódio, correspondendo a cada solução determinada humidade relativa constante.

Nas argamassas e betões é importante conhecer a forma como a água se evapora, uma vez que, é bem conhecido, que a velocidade de absorção de água por capilaridade é superior à velocidade de perda de água por evaporação, o que contribui para que argamassas e betões contenham sempre um determinado teor de humidade, superior à humidade ambiente.

Sendo assim, uma boa caracterização das argamassas exige a realização de ensaios de evaporação

O ensaio de evaporação foi realizado nos mesmos provetes dos ensaios de absorção de água por capilaridade e determinação da porosidade livre (12 provetes prismáticos por cada argamassa), segundo a metodologia proposta pelo Laboratoire de Pétrophysique du Centre de Géochimie de la Surface de Strasbourg (Mertz, 1991; Hammecker, 1993).

Os ensaios iniciam-se após a realização do ensaio para a determinação da porosidade livre, portanto, em provetes saturados e com uma idade de cerca de 170 dias. Os provetes são envolvidos por uma película aderente de polietileno, deixando apenas uma das faces exposta, face por onde a água se evapora. Em seguida, os provetes são pesados e inseridos em recipientes herméticos à temperatura de 20°C e humidade relativa de 75%, controlada por uma solução aquosa sobressaturada em cloreto de sódio (Figura 4.25). Durante o ensaio é feito o registo do peso e do instante da medição, considerando-se terminado o ensaio quando os provetes apresentam peso constante durante pelo menos 48 horas consecutivas.

Em todos os provetes a evaporação deu-se por um mesmo tipo de superfície, uma superfície serrada, em provetes com alturas de 30 mm e 45 mm. Assim, juntamente com os dados dos ensaios de absorção de água por capilaridade e de porosidade livre, poder-se-á inferir acerca da influência da altura dos provetes nestes ensaios.



Figura 4.25 – Ensaio de evaporação.

4.3.8.2. Apresentação dos resultados

O ensaio de evaporação é traduzido pela curva da perda de peso por unidade de superfície (dW/S) em função do tempo (t).

Na Figura 4.26 apresentam-se as curvas obtidas para cada uma das argamassas e na Figura 4.27 a comparação entre as diversas curvas médias obtidas.

À semelhança do verificado no ensaio de absorção de água por capilaridade, em todas as argamassas existem duas famílias de curvas que distinguem os provetes com 45mm e 30mm de altura.

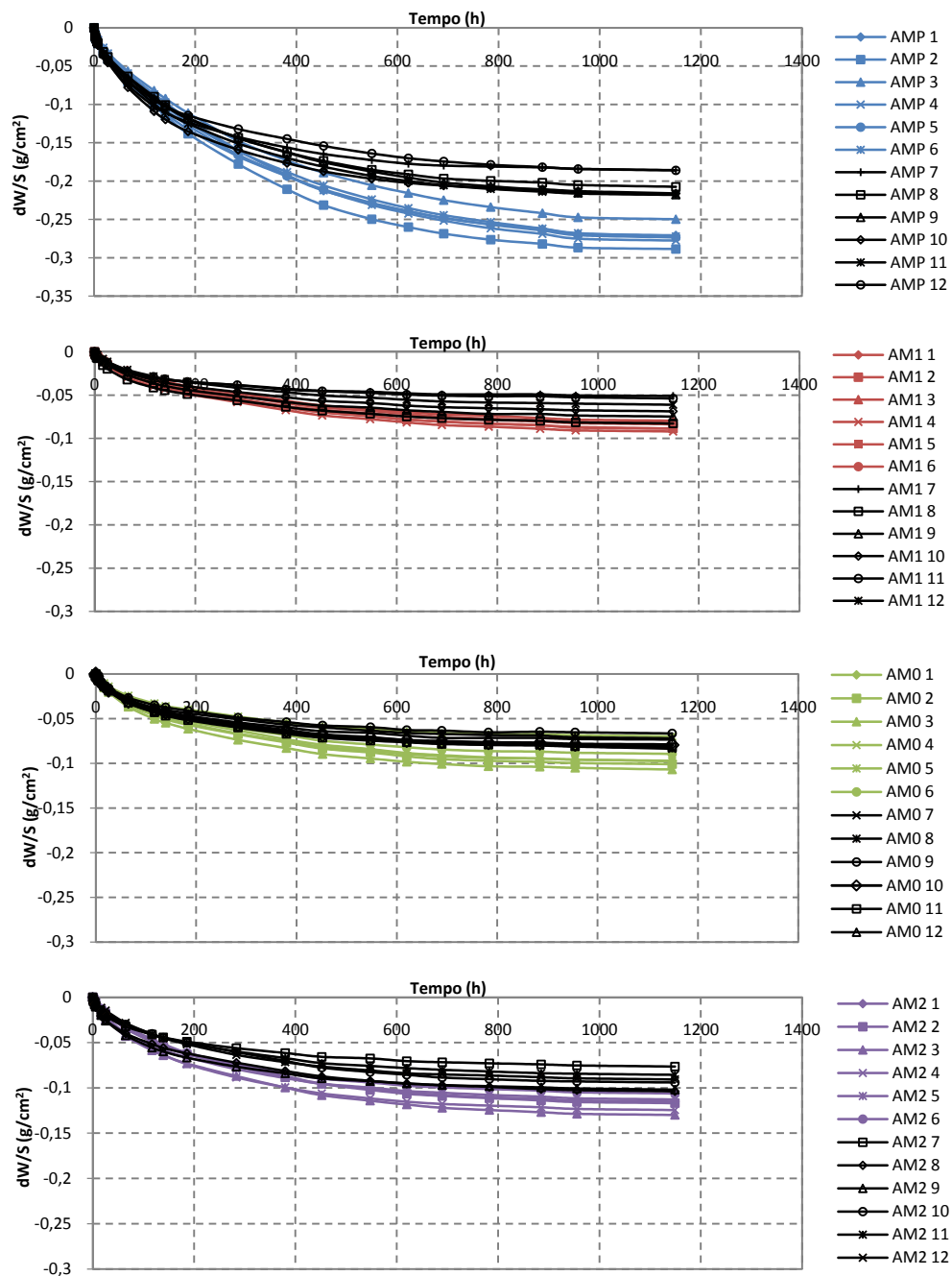


Figura 4.26 – Curvas de evaporação para cada uma das argamassas.

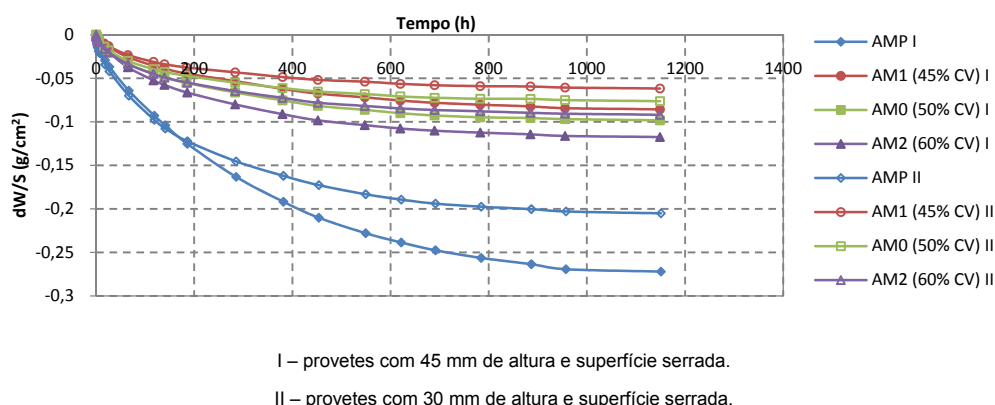


Figura 4.27 – Curvas médias de evaporação de água das argamassas.

4.3.8.3. Discussão dos resultados

As curvas de perda de peso por unidade de superfície em função do tempo apresentam um primeiro segmento de recta de forte declive, que corresponde a um período no qual o fluxo de evaporação do vapor de água é constante; um segmento intermédio curvo em que há uma diminuição progressiva do fluxo; e, um segundo segmento rectilíneo, com fluxo de evaporação constante, mas muito inferior ao inicial. O ponto onde o fluxo de evaporação deixa de ser constante (ponto de transição entre o primeiro e o segundo troço) define a evaporação crítica, quando a evaporação deixa de se fazer à superfície.

A argamassa que apresenta um primeiro segmento com maior inclinação é a argamassa de referência, seguida das argamassas AM2 (60% CV), AM0 (50% CV) e AM1 (45% CV). Estes resultados, traduzem que o tamanho dos poros é maior na argamassa padrão do que nas argamassas com cinzas, uma vez que a água sai em primeiro lugar pelos poros de maior dimensão. Este ensaio, ao contrário do ensaio de absorção de água por capilaridade, não mostrou ser tão sensível à grande variação da porosidade livre, uma vez que todas as argamassas com cinzas mostraram menor velocidade de evaporação.

Comparando as argamassas com cinzas, entre elas, apenas a argamassa com 60% de cinzas mostra uma aparente incoerência com as outras argamassas. No entanto, esta argamassa, pelos motivos anteriormente discutidos, deve na realidade apresentar poros de maior dimensão do que as outras com 45 e 50% de cinzas.

A análise dos resultados, permite concluir que, tal como para a absorção de água por capilaridade, a altura dos provetes influencia os resultados, uma vez que para todas as argamassas os gráficos (Figuras 4.26 e 4.27) mostram duas famílias de curvas, uma para os provetes de 30 mm e outra para os de 45 mm.

Os provetes com menor altura evidenciam uma estabilização mais rápida mantendo, no entanto, a mesma velocidade inicial de evaporação que os provetes de maior altura. Esta diferença pode ser explicada pela menor quantidade de água que os provetes de 30 mm absorveram no ensaio de capilaridade, portanto, a perda de água por evaporação também terá de ser menor quando comparada com os provetes de 45 mm.

4.3.9. PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DA ÁGUA SOB PRESSÃO

4.3.9.1. Descrição do ensaio

O mecanismo mais frequente, em estruturas correntes, de transporte de água através da rede porosa quer do betão, quer das argamassas é, como já foi referido, a absorção capilar. No entanto, interessa também estudar o comportamento das argamassas de reparação quando sujeitas a água sob pressão, dado que o elemento estrutural a reparar poderá estar sujeito a este tipo de acções.

O ensaio para a determinação da profundidade de penetração da água sob pressão foi realizado com base na norma NP EN 12390-8 (2003). Esta norma é específica para o betão, no entanto para poder ser utilizada em argamassas foram feitas algumas alterações de modo a facilitar a sua adequabilidade.

Para a realização deste ensaio os provetes são colocados num aparelho normalizado (Figura 4.28). Este ensaio consiste essencialmente na aplicação de água com uma dada pressão, (500 ± 50) kPa, numa das superfícies moldadas dos provetes, durante 72 ± 2 horas. No final do ensaio, remove-se o provete do aparelho e limpa-se a face na qual a pressão de água foi aplicada para remover o excesso de água. Divide-se o provete ao meio, perpendicularmente à face na qual a pressão de água foi aplicada e marca-se a linha de penetração da água. Finalmente, mede-se a profundidade máxima de penetração sob a área de ensaio com aproximação ao mm.

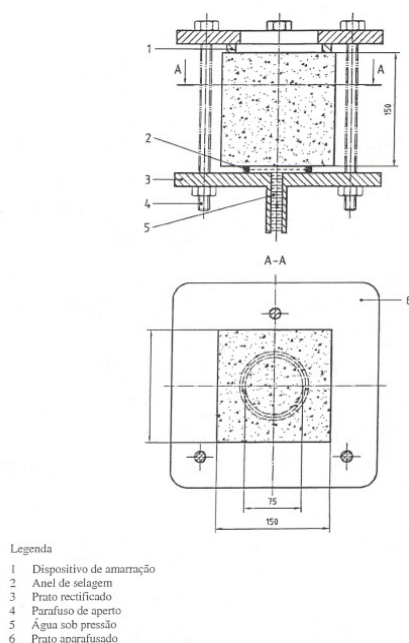


Figura 4.28 – Dispositivo de ensaio para a penetração de água sob pressão.

Para a realização do ensaio, a norma preconiza a utilização de provetes cúbicos, cilíndricos ou prismáticos com o comprimento da aresta, ou o diâmetro, não inferior a 150 mm. Uma vez que a produção de provetes cúbicos de argamassa com 150 mm de aresta levaria a um grande consumo de material, optou-se por fabricar cubos com 100 mm de aresta. A norma refere que os provetes devem ser ensaiados com pelo menos 28 dias de idade, no entanto este ensaio realizou-se aos 60 dias, uma vez que a reacção de hidratação nas argamassas com cinzas volantes é lenta. Assim, para cada uma das quatro argamassas em estudo foram feitos dois cubos com 100 mm de aresta. Após a desmoldagem os provetes foram conservados na câmara de cura até à data do ensaio.

Na Figura 4.29 apresentam-se algumas imagens da realização deste ensaio e na Figura 4.30, uma imagem dos provetes depois de abertos



Figura 4.29 – Ensaio de penetração de água sob pressão.



Figura 4.30 – Visualização da linha de penetração de água após abertura dos provetes.

4.3.9.2. Apresentação dos resultados

No Quadro 4.10 apresentam-se os valores médios, para cada argamassa, da profundidade máxima de penetração da água nos provetes.

Quadro 4.10 – Profundidade máxima de penetração da água.

Argamassa	Profundidade de penetração (mm)
AMP	8,87
AM1 (45% CV)	9,11
AM0 (50% CV)	8,46
AM2 (60% CV)	12,08

4.3.9.3. Discussão dos resultados

Há uma aparente incoerência nos valores destes resultados, apresentando a argamassa de referência e as argamassas com 45 e 50% de cinzas valores muito próximos e a argamassa com 60% de cinzas um valor mais elevado. A água sob pressão entra com mais facilidade em poros de maiores dimensões, o que levaria, conjuntamente com os valores superiores da porosidade livre, a que a argamassa de referência exibisse a maior profundidade de penetração. A idade com que o ensaio é realizado pode ser um factor determinante por, em consequência da reacção pozolânica ser lenta, a rede porosa das argamassas com cinzas ainda não estar devidamente refinada, caso o ensaio seja feito demasiadamente cedo. Ao analisar a Figura 4.6, que representa a evolução da resistência à compressão das argamassas com a idade, verifica-se que aos 60 dias (idade dos provetes no início do ensaio) a reacção de hidratação das argamassas com cinzas ainda está longe de ter estabilizado. Como referido no Capítulo 2, segundo Fraay *et al.*, (1989), no caso das cinzas volantes de baixo teor de cálcio, ao fim de um ano a quantidade de cinzas que ainda não reagiu pode atingir 50%.

4.3.10. DISSOLUÇÃO/CRISTALIZAÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS

4.3.10.1. Descrição do ensaio

Os sais solúveis dissolvem-se na água, formando soluções salinas que se transferem ou ascendem por capilaridade nas edificações, cristalizando nas zonas de evaporação das construções. As variações dos teores de água líquida e de humidade fazem com que os sais cristalizem, se hidratem e se dissolvam, repetindo-se este processo até à destruição do material, devido ao desenvolvimento de forças de cristalização.

Os minerais de sais solúveis mais frequentes são os sulfatos, cloretos, nitratos e carbonatos simples ou duplos de sódio, potássio, cálcio e magnésio, os nitratos de amónia e os oxalatos de cálcio.

O efeito dos sais solúveis em betões e argamassas tradicionais não se traduz, de uma maneira geral por deteriorações, à excepção de deteriorações estéticas, provocadas por eflorescências, uma vez que a rede porosa destes materiais tem dimensões suficientes para fazer face ao aumento de volume dos sais, sem introdução de tensões. No entanto, o refinamento da rede porosa das argamassas com cinzas volantes, obriga a investigar a possibilidade de deteriorações com origem em ciclos dissolução/cristalização de sais solúveis, uma vez que se conhece a sua acção nefasta em materiais com rede porosa muito fina, tais como a pedra.

Com este ensaio pretende-se determinar o efeito dos ciclos de dissolução e evaporação de sais solúveis nas argamassas com cinzas volantes. O poder destrutivo destes ciclos nas pedras é bem conhecido e o seu estudo encontra-se bastante aprofundado, sendo o efeito destrutivo tanto maior quanto maior o número de ciclos a que os provetes estão sujeitos. Porém, no caso das argamassas não. Como foi dito, apesar de ser um fenómeno mais associado às pedras, é de extrema importância conhecer a acção destes ciclos de dissolução/evaporação nas argamassas de reparação pois estas poderão ter de ser aplicadas em ambientes com elevadas concentrações de sais solúveis.

Não existe qualquer norma que regule estes ensaios em argamassas, tendo-se por isso seguido a metodologia de ensaio utilizada por Ferreira (2004) para o estudo deste fenómeno em granitos. Assim, os provetes, secos em estufa, à temperatura de 65°C, até massa constante, foram sujeitos a 28 ciclos de imersão/secagem com a duração de um dia por ciclo. Cada ciclo compreendeu a imersão de uma face dos provetes até aproximadamente 3 mm da sua altura numa solução aquosa de NaCl a 10% M/M. O provete foi colocado, à temperatura de 35°C, sobre uma rede de borracha para permitir a livre absorção. Esta imersão foi mantida durante 6 horas, dentro de uma estufa à temperatura referida,

seguindo-se a secagem dos provetes durante 18 horas na mesma estufa, à mesma temperatura, sobre as grelhas da máquina. A solução salina foi mudada três vezes por semana.

Para cada uma das argamassas, foram utilizados oito provetes cúbicos com 40 mm de aresta, dos quais metade apresentava uma superfície de ensaio serrada e outra metade uma superfície moldada. À data do ensaio os provetes apresentavam uma idade de aproximadamente 200 dias.

Para a quantificação deste ensaio, procedeu-se inicialmente à pesagem dos provetes. Após os 28 ciclos os provetes foram secos a uma temperatura de 65°C, até massa constante, e foram novamente pesados, de modo a ter-se uma ideia da quantidade de sal que cristalizou em cada provete. Em seguida, os provetes foram lavados abundantemente com água, e mergulhados em água destilada, renovada várias vezes, com a finalidade de se proceder à dissolução dos sais. Após esta operação, os provetes foram novamente secos em estufa, até massa constante, e foram comparados os valores iniciais e finais das suas massas, de modo a contabilizar eventuais perdas de material causadas pela acção do cloreto de sódio.

Escolheu-se a halite (NaCl) para a realização deste ensaio por ser o sal que possui a pressão de cristalização mais forte, visto que dos principais minerais de sais solúveis é o que apresenta o menor volume molar (Quadro 4.11). Para uma dada temperatura e um determinado grau de sobressaturação, os sais com menores volumes molares são os que apresentam maiores pressões de cristalização (Begonha, 2001).

Quadro 4.11 – Principais minerais de sais solúveis – composições químicas e volumes molares (Begonha, 2001).

Mineral	Fórmula química	Volume molar (cm ³ /mol)
Halite	NaCl	27,06
Calcite	CaCO ₃	36,80
Soda niter	NaNO ₃	37,11
Anidrite	CaSO ₄	46,31
Niter	KNO ₃	47,69
Thenardite	Na ₂ SO ₄	53,00
Gesso	CaSO ₄ .2H ₂ O	74,21
Glauberite	Na ₂ Ca(SO ₄) ₂	100,06
Aptitalite	NaK ₃ (SO ₄) ₂	125,44
Singenite	K ₂ Ca(SO ₄) ₂ .H ₂ O	126,32
Epsomite	MgSO ₄ .7H ₂ O	140,82
Mirabilite	Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	217,70
Etringite	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (HO) ₁₂ .26H ₂ O	705,12

Na Figura 4.31 são apresentadas algumas imagens da realização deste ensaio.



Figura 4.31 – Ensaio de dissolução/cristalização de sais solúveis.

4.3.10.2. Apresentação dos resultados

No Quadro 4.12 apresentam-se as variações das massas dos provetes, relativamente à massa inicial, sem lavagem do sal e após lavagem. Os provetes que foram ensaiados com uma das superfícies moldadas voltadas para baixo são indicados por (M) e os restantes, ensaiados segundo uma das superfícies serradas são referidos por (S).

Quadro 4.12 – Variação da massa dos provetes.

Argamassa	ΔM – sem lavagem (%)	ΔM – após lavagem (%)
AMP (M)	13,19	1,71
AMP (S)	14,35	1,61
AM1 (45% CV) (M)	17,97	0,16
AM1 (45% CV) (S)	17,65	0,05
AM0 (50% CV) (M)	16,90	0,41
AM0 (50% CV) (S)	20,53	0,37
AM1 (60% CV) (M)	16,76	0,45
AM1 (60% CV) (S)	25,10	0,69

4.3.10.3. Discussão dos resultados

A análise deste ensaio deve ser qualitativa e não quantitativa, uma vez que não se conseguiu extrair completamente o sal das argamassas, conforme apresentado no Quadro 4.12, não se podendo assim quantificar a massa de material efectivamente perdida por cada argamassa. No entanto, por observação das superfícies das argamassas após lavagem é evidente que há maior perda de massa nas argamassas com cinzas, não se conseguindo diferenciar estas entre elas (Figura 4.32).



Figura 4.32 – Aspecto final dos provetes, após lavagem e secagem.

Este comportamento está de acordo com o refinamento da rede porosa das argamassas com cinzas, não evidenciado no ensaio de absorção capilar, talvez por a idade dos provetes ser de 90 dias, e agora de 200 dias. Como se referiu, já algumas vezes, este refinamento é mais notório para idades superiores a 180 dias, dado a reacção pozolânica ser lenta.

Como referido, trabalhos relativos à acção gelo/degelo, realizados por Joshi *et al.*(1993), em betões com cinzas, sem introdutores de ar, quando comparados com um betão só com cimento, mostraram um comportamento idêntico ao verificado pelas argamassas do presente trabalho à acção da cristalização de sais solúveis, uma vez que os fenómenos envolvidos nos dois estudos são semelhantes.

As degradações das argamassas com cinzas, evidenciadas pela perda de massa no ensaio com sais, são provocadas pelo facto de os poros, mais finos nas argamassas com cinzas, não aguentarem as tensões induzidas pelo aumento de volume provocado pela cristalização dos sais.

No final do ensaio e antes da lavagem, é enorme a diferença observada entre a quantidade de sal apresentado à superfície das argamassas com cinzas volantes, quando comparadas com a argamassa padrão (Figura 4.33). Também nas primeiras argamassas a cristalização de sais dá-se em todas as superfícies, enquanto que na de referência apenas se dá nas superfícies laterais. Isto deve-se ao facto de as redes porosas mais finas apresentarem uma maior velocidade de ascensão capilar.



Figura 4.33 – Provetes no final do ensaio, antes de serem lavados.

4.3.11. RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO ACELERADA

4.3.11.1. Descrição do ensaio

As reacções de hidratação do cimento originam um meio fortemente alcalino, com um pH da ordem dos 13. As armaduras de aço embebidas em argamassas ou betões hidratados são revestidas por uma fina película de óxidos e hidróxidos, película passiva, que adere fortemente ao aço e que impede a sua corrosão. Entre os processos para a destruição desta película, refere-se a carbonatação, reacção do dióxido de carbono da atmosfera com os hidróxidos alcalinos, principalmente o hidróxido de cálcio originando carbonato de cálcio e reduzindo o pH para valores inferiores a nove, podendo provocar a destruição da película passiva.

Os meios porosos das argamassas com cinzas apresentam um pH inferior ao das argamassas de cimento portland, sendo portanto necessário averiguar se por este facto a carbonatação se dá mais rapidamente do que na argamassa de referência. Como se referiu no Capítulo 2 não há acordo entre os diferentes autores em relação a este ponto.

Para a comparação do comportamento das argamassas à carbonatação, foi seguida a metodologia da especificação E 391 (1993) do LNEC.

Para cada uma das quatro argamassas estudadas, foram ensaiados 3 provetes, com a dimensão de $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$, com idades de aproximadamente 160 dias. Segundo a especificação, após a desmoldagem dos provetes, estes devem ser curados em água a $20 \pm 2 \text{ °C}$ durante 14 dias e depois ao

ar em sala com temperatura de 20 ± 2 °C e humidade relativa condicionada, 50 ± 5 %, até se atingirem os 28 dias. No entanto, os provetes ensaiados não seguiram exactamente essa indicação, uma vez que após a desmoldagem o período de cura húmida se estendeu por 146 dias, seguidos de 14 dias nas condições indicadas (HR de 50 ± 5 % e temperatura de 20 ± 2 °C), perfazendo os 160 dias, data do início do ensaio.

O procedimento para este ensaio consiste na medição da profundidade de carbonatação em provetes expostos em câmara com $5 \pm 0,1$ % de CO₂ e 60 ± 5 % de humidade relativa e à temperatura de 23 ± 3 °C. Os provetes foram mantidos nestas condições durante 2 meses.

Não se pretendeu determinar a evolução da profundidade de carbonatação ao longo do tempo, mas apenas verificar as diferenças entre essas profundidades ao fim de dois meses, em que os provetes estiveram na câmara. No fim do ensaio os provetes foram cortados ao meio, longitudinalmente, tendo-se avaliado a profundidade de carbonatação, utilizando uma solução alcoólica de fenolftaleína a 0,1%, que muda de cor em função do pH. Para valores de pH inferiores a 8,9 a solução é incolor (representando a matéria carbonatada) e, apresenta-se vermelho-púrpura ou rosa forte quando o pH é superior a 8,9 (matéria não carbonatada).

Apresentam-se na Figura 4.34 algumas imagens da câmara de carbonatação e dos provetes utilizados no ensaio.

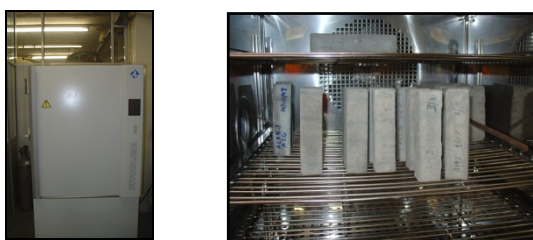


Figura 4.34 – Câmara de carbonatação e provetes.

4.3.11.2. Apresentação dos resultados

No Quadro 4.13 apresentam-se as profundidades médias de carbonatação para as diferentes argamassas. Os valores perpendiculares a X referem-se à profundidade medida segundo a normal aos topos dos provetes e os valores perpendiculares a Y às faces laterais.

Quadro 4.13 – Profundidades médias de carbonatação.

Argamassa	perpendicular a X (mm)	perpendicular a Y (mm)
AMP	≈ 0	≈ 0
AM1 (45% CV)	6,4	6,3
AM0 (50% CV)	9,8	9,3
AM2 (60% CV)	19,9	13,4

Ilustram-se nas Figuras 4.35 a 4.38 as imagens referentes aos provetes ensaiados, das quatro argamassas, após pulverização com fenolftaleína.



Figura 4.35 – Argamassa de referência.



Figura 4.36 – Argamassa AM1 (45% CV).

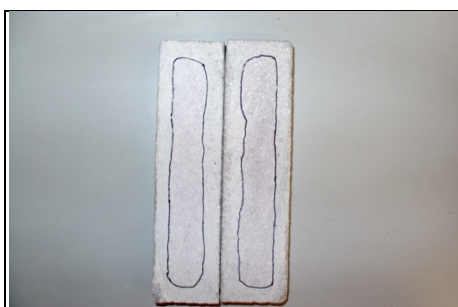


Figura 4.37 – Argamassa AM0 (50% CV).

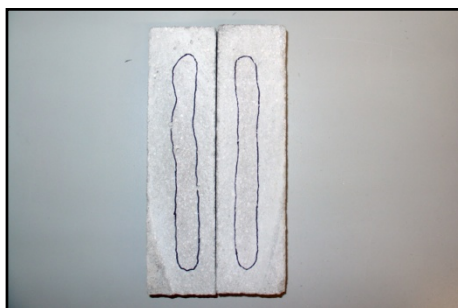


Figura 4.38 – Argamassa AM2 (60% CV).

4.3.11.3. Discussão dos resultados

Os resultados deste ensaio, apresentados no Quadro 4.13, exibem uma profundidade de carbonatação maior nas argamassas com cinzas do que na argamassa padrão. Nas argamassas com 50% e 60% de cinzas volantes a profundidade de carbonatação é maior do que nas de 45%.

Nas argamassas com cinzas, como se referiu no Capítulo 2, há dois efeitos contraditórios. Por um lado, dada a elevada redução da porosidade nestas argamassas a difusão do dióxido de carbono é retardada. Por outro lado, há uma redução do pH, favorecendo uma aceleração da carbonatação.

Embora estes resultados possam estar aparentemente coerentes, considerando que o efeito da redução do pH das argamassas com cinzas prevaleceu sobre o efeito do atraso na difusão do dióxido de carbono, estes resultados têm que ser olhados com alguma reserva, uma vez que se trata de uma câmara de carbonatação nova, sem ensaios comparativos com outras câmaras. As aparentes incoerências deste ensaio têm a ver, em primeiro lugar, com a ausência de carbonatação da argamassa padrão e em segundo lugar com o facto de superfícies do mesmo provete, que deveriam apresentar profundidades de carbonatação semelhantes, apresentarem profundidades muito diferentes.

4.3.12. RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE CLORETOS

4.3.12.1. Descrição do ensaio

A penetração de cloretos em argamassas ou betões é outro dos mecanismos que pode induzir a corrosão das armaduras, por destruição da película passiva. Para que a despassivação das armaduras ocorra por acção dos iões cloreto, é necessário que estes iões penetrem na argamassa ou betão e atinjam junto da armadura uma concentração superior ao teor crítico em cloretos.

Os meios porosos das argamassas com cinzas apresentam menores concentrações de hidróxido de cálcio, sendo portanto necessário averiguar a profundidade de penetração dos cloretos e o coeficiente de difusão, uma vez que a redução da concentração de hidróxido de cálcio conduz a uma redução do teor crítico de cloretos.

Para a quantificação da resistência à penetração de cloretos foi seguida a especificação do LNEC E 463 (2004), que permite a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos por ensaio de migração em regime não estacionário.

Foram ensaiados três provetes cilíndricos por cada argamassa, com 100 mm de diâmetro e 50 mm de altura (Figura 4.39). À data do ensaio os provetes apresentavam uma idade de 60 dias.

Antes do início do ensaio, os provetes têm de ser colocados numa câmara de vácuo, para serem sujeitos a um tratamento, a uma pressão de -500 mmHg, durante 2 horas (Figura 4.40). Após esse tempo, mantendo a mesma pressão, enche-se o recipiente com uma solução saturada de $\text{Ca}(\text{HO})_2$ de modo a que todos os provetes fiquem imersos. Mantém-se a bomba de vácuo em funcionamento por mais uma hora, após o que se desliga a bomba e os provetes são mantidos na solução durante mais 18 ± 2 horas.



Figura 4.39 – Provetes utilizados para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos.



Figura 4.40 – Câmara de vácuo.

O equipamento utilizado para a realização deste ensaio não foi o mesmo descrito na especificação seguida, no entanto, o princípio de funcionamento é o mesmo. Cada uma das células de ensaio, em plástico, consiste em duas metades unidas por intermédio de quatro varões roscados, sendo que entre as metades de cada célula é colocado um provete, fixado por intermédio de dois anéis de borracha e de um anel em plástico (Figura 4.41).

Em cada uma das metades das células existe um recipiente onde são colocadas as soluções anódicas e catódicas. A solução catódica é uma solução a 10% M/M de NaCl em água da torneira (100 g de NaCl em 900 g de água, aproximadamente 2N) e a solução anódica é uma solução de NaHO 0,3N em água destilada (aproximadamente 12 g de NaHO num litro de água). As temperaturas dos provetes e das soluções devem ser mantidas entre 20-25°C durante o ensaio. Em todos os provetes, colocou-se a superfície moldada voltada para a solução catódica.

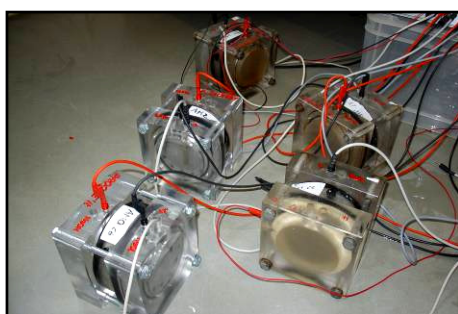


Figura 4.41 – Células de ensaio já montadas.

Como o equipamento disponível apenas permitia o ensaio de oito provetes em simultâneo e, em virtude de existirem 12 provetes (três por cada uma das quatro argamassas), decidiu-se ensaiar metade dos provetes em dois dias consecutivos. Cada ensaio teve a duração de 24 horas.

Depois de estarem montadas as seis células, liga-se em cada uma o cátodo ao pólo negativo da fonte de alimentação e o ânodo ao pólo positivo (Figura 4.42). Liga-se a fonte de alimentação com uma voltagem de 30V e regista-se a intensidade de corrente inicial que passa em cada provete. Regista-se ainda a temperatura inicial em cada solução anódica, indicada pelo termómetro ou pelo termopar. Imediatamente antes do final do ensaio, anotam-se os valores da intensidade da corrente e da temperatura.

O potencial eléctrico aplicado entre os topos dos provetes, irá forçar, por migração, o transporte dos iões cloreto através da argamassa.

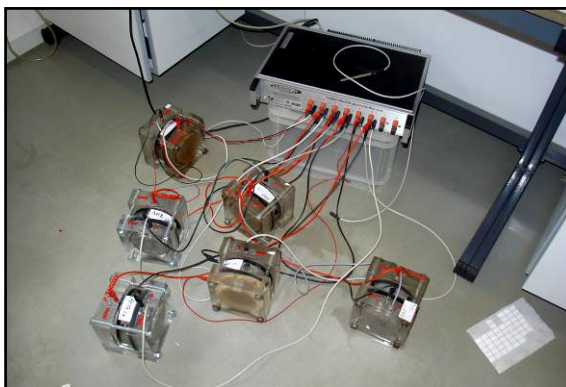


Figura 4.42 – Ensaio de seis provetes para a determinação do coeficiente de difusão dos cloretos nas argamassas em estudo.

No final do ensaio, desmontam-se as células e seccionam-se axialmente os provetes por compressão diametral, em duas partes, escolhendo-se, para efectuar a medição da profundidade de penetração dos cloretos, aquela que tiver a superfície de fractura o mais perpendicular possível relativamente aos topos. Imediatamente pulveriza-se a superfície de fractura com uma solução de AgNO_3 0,1N.

Quando o precipitado branco do cloreto de prata for claramente visível na superfície de fractura (Figura 4.43), mede-se a profundidade de penetração, recorrendo a um paquímetro digital, segundo o esquema da Figuras 4.44 e 4.45.



Figura 4.43 – Provetes após seccionamento e pulverização com nitrato de prata.

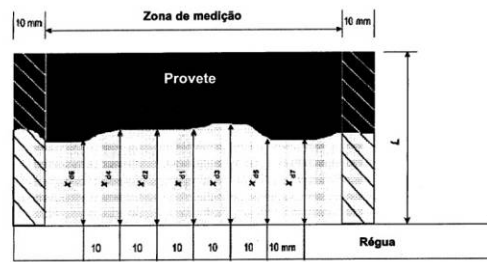


Figura 4.44 – Esquema da medição das profundidades de penetração dos cloretos.

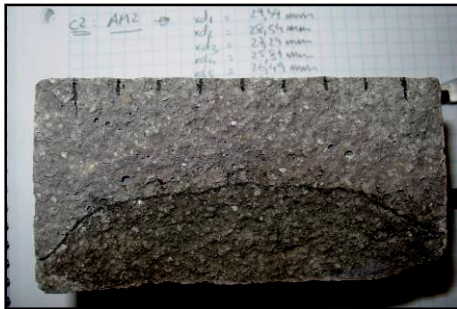


Figura 4.45 – Medição das profundidades de penetração dos cloretos, com auxílio de um paquímetro digital.

Finalmente, o coeficiente de difusão em regime não estacionário pode ser obtido a partir da equação:

$$D = \frac{RT}{zFE} \cdot \frac{xd - \alpha \sqrt{xd}}{t} \quad (4.4)$$

sendo:

$$E = \frac{U - 2}{L} \quad (4.5)$$

$$\alpha = 2 \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad (4.6)$$

- D, o coeficiente de difusão em regime não estacionário, m²/s;
- z, o valor absoluto da valência do ião, para os cloretos, z = 1;
- F, a constante de Faraday: F = 9,648 × 10⁴ J/(V.mol);
- U, o valor absoluto da voltagem aplicada, V;
- R, a constante dos gases perfeitos: R = 8,314 J/(K.mol);
- T, o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, K;
- L, a espessura do provete, m;
- x_d, o valor médio da profundidade de penetração, m;
- t, a duração do ensaio, segundos;

erf^{-1} , o inverso da função erro;

- c_d , a concentração de cloretos para a qual ocorre mudança de cor: $c_d \approx 0,07N$ para betão com cimento CEM I;

- c_0 , a concentração de cloretos na solução catódica ($c_0 \approx 2N$);

Visto que $\text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2 \times 0,07}{2}\right) = 1,28$ pode-se usar a seguinte equação simplificada:

$$D = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \quad (4.7)$$

sendo:

- D , o coeficiente de difusão em regime não estacionário, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

- U , o valor absoluto da voltagem aplicada, V;

- T , o valor médio das temperaturas inicial e final na solução anódica, °C;

- L , a espessura do provete, mm;

- x_d , o valor médio da profundidade de penetração, mm;

- t , a duração do ensaio, horas;

4.3.12.2. Apresentação dos resultados

Nos Quadros 4.14 e 4.15 são apresentados para as diferentes argamassas os valores médios das profundidades de penetração e dos coeficientes de difusão em regime não estacionário, respectivamente.

Quadro 4.14 – Profundidade de penetração dos cloretos.

Argamassa	x_d (mm)
AMP	25,4
AM1 (45% CV)	10,0
AM0 (50% CV)	12,9
AM2 (60% CV)	25,3

Quadro 4.15 – Coeficiente de difusão dos cloretos em regime não estacionário.

Argamassa	$D (\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s})$
AMP	22,7
AM1 (45% CV)	7,9
AM0 (50% CV)	10,6
AM2 (60% CV)	22,5

4.3.12.3. Discussão dos resultados

Os resultados obtidos mostram, em relação à profundidade de penetração dos cloretos, valores mais elevados para a argamassa padrão e para a argamassa com 60% de cinzas. As argamassas com 45% e 50% de cinzas volantes apresentam valores semelhantes e muito inferiores aos das primeiras. No entanto, considerando os valores da porosidade há um aparente exagero no valor da profundidade de penetração da argamassa com 60% de cinzas, o que pode ser explicado por o ensaio ter sido realizado aos 60 dias, idade aparentemente insuficiente devido à lenta reacção pozolânica.

Os coeficientes de difusão, calculados com base nessas profundidades, mostram que a argamassa com 45% de cinzas apresenta um coeficiente de difusão 2,9 vezes inferior ao da argamassa padrão.

Estes resultados estão de acordo com os estudos de Al-Amoudi *et al.*(1993); Ellis Jr. *et al.*(1991); e Schiessl e Raupach (1989), anteriormente citados, que referem que quando é utilizada uma quantidade devidamente proporcionada de cinzas volantes no betão, a sua penetrabilidade é significativamente reduzida e aumenta a sua resistividade, reduzindo assim a taxa de corrosão.

4.3.13. RESISTIVIDADE ELÉCTRICA

4.3.13.1. Descrição do ensaio

As medidas de resistividade eléctrica do betão podem, desde que convenientemente interpretadas, ser utilizadas directamente como um parâmetro de avaliação da uniformidade do betão, que permite detectar zonas de heterogeneidade do betão, correspondendo a zonas de maior potencialidade corrosiva ou a zonas com diferentes teores de humidade. Podem ainda ser usadas como uma medida da velocidade de corrosão e da difusão dos iões cloreto no betão.

A medição da resistividade dos materiais cimentícios pode ser realizada através de eléctrodos a 2 pontos ou a 4 pontos (sonda de Wenner). No entanto, uma vez que o ensaio de resistência à penetração de cloretos forneceu todos os dados necessários à determinação da resistividade, esta foi calculada, com base nesse ensaio, a partir da equação seguinte:

$$\rho = \frac{UA}{IL} \quad (4.8)$$

sendo:

- ρ , a resistividade eléctrica, $\Omega.m$;
- U , o valor absoluto da voltagem aplicada, V;
- A , a área da secção transversal do provete, m^2 ;
- I , a intensidade de corrente inicial, A;
- L , a espessura do provete, m.

A idade dos provetes para a qual foi determinada a resistividade foi, claro, a mesma do ensaio de penetração de cloretos, 60 dias.

4.3.13.2. Apresentação dos resultados

No Quadro 4.16 são apresentados os valores da intensidade de corrente inicial e da resistividade eléctrica, para cada uma das argamassas.

Quadro 4.16 – Intensidade de corrente inicial e resistividade eléctrica das diferentes argamassas.

Argamassa	I (A)	ρ ($\Omega.m$)
AMP	0,088567	53,2
AM1 (45% CV)	0,021233	221,9
AM0 (50% CV)	0,027233	173,0
AM2 (60% CV)	0,043467	108,4

4.3.13.3. Discussão dos resultados

Quanto menor for a porosidade da argamassa, maior será a sua resistividade e também menor a difusão de cloretos. No entanto, apesar de AM0 (50% CV) e AM1 (45% CV) terem apresentado valores da mesma ordem de grandeza, a última argamassa apresenta uma resistividade eléctrica 1,28 vezes superior. Contudo, estas argamassas apresentam uma resistividade muito superior à argamassa padrão e à argamassa com 60% de cinzas.

Através da análise dos resultados obtidos e da classificação do Quadro 2.6 (secção 2.2.3.3.), todas as argamassas com cinzas volantes apresentam uma progressão de corrosão baixa ou baixa a moderada, enquanto que a argamassa padrão exibe uma progressão de corrosão elevada.

4.3.14. RESISTÊNCIA AO CALOR

4.3.14.1. Descrição do ensaio

As propriedades mecânicas e de deformabilidade dos materiais cimentícios são adversamente afectadas pela exposição térmica contínua, a temperaturas superiores a 35°C, devido à perda elevada da humidade interior do material. Consequentemente, poder-se-á esperar que ocorra desagregação do betão (Ribeiro, 2004).

A resistência ao calor foi determinada expondo as argamassas a uma temperatura de 105°C durante 28 dias consecutivos. As argamassas foram então deixadas ao ar até estabilizar a temperatura, após o que, foram ensaiadas à flexão e à compressão (no estado seco).

Para cada argamassa foram ensaiados três provetes com 40 x 40 x 160 mm³, primeiro à flexão e em seguida as metades resultantes, à compressão.

Uma vez que temperaturas elevadas influenciam o desenvolvimento da resistência mecânica dos materiais cimentícios, ou seja, aceleram as reacções de hidratação dos componentes do cimento, os provetes de argamassa só foram sujeitos à temperatura de ensaio aos seis meses. Portanto, durante seis meses os provetes permaneceram em cura húmida e, em seguida, foram colocados na estufa à temperatura referida. Os provetes foram ensaiados quando apresentavam uma idade de sete meses, o que permitiu comparar os resultados obtidos com os provetes ensaiados à mesma idade, sujeitos a sete meses de cura húmida.

Este ensaio não pretendeu contemplar o comportamento ao fogo das argamassas, cuja metodologia de ensaio está descrita na EN 13501-1.

4.3.14.2. Apresentação dos resultados

Os resultados do ensaio de flexão são apresentados no Quadro 4.17 e os de compressão no Quadro 4.18.

Quadro 4.17 – Resistência à flexão das argamassas aos 210 dias, após 28 dias a 105°C.

Argamassa	Resistência à flexão (MPa)
AMP	13,1
AM1 (45% CV)	12,6
AM0 (50% CV)	12,8
AM2 (60% CV)	12,6

Quadro 4.18 – Resistência à compressão das argamassas aos 210 dias, após 28 dias a 105°C.

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)
AMP	71,7
AM1 (45% CV)	65,4
AM0 (50% CV)	64,6
AM2 (60% CV)	66,6

Nas Figuras 4.46 e 4.47 são então comparados os valores obtidos neste ensaio e no ensaio das resistências mecânicas (4.3.3.), para a idade de 210 dias. No Quadro 4.19 são apresentadas as diferenças percentuais entre os dois ensaios.

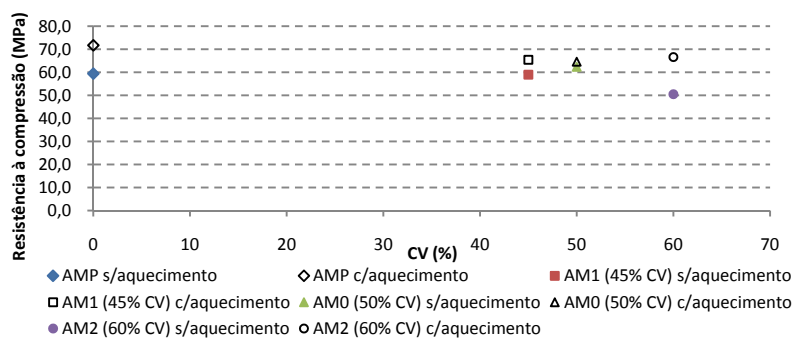


Figura 4.46 – Resistências à compressão das argamassas aos 210 dias, com e sem aquecimento.

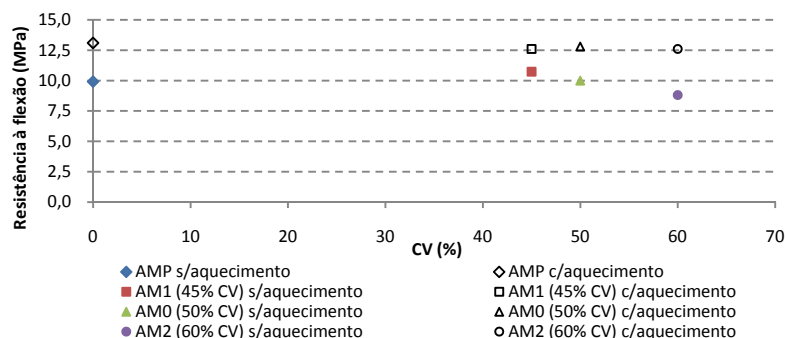


Figura 4.47 – Resistências à flexão das argamassas aos 210 dias, com e sem aquecimento.

Quadro 4.19 – Diferenças percentuais das resistências mecânicas aos 210 dias, com e sem aquecimento.

Argamassa	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à flexão (MPa)		
	≈20°C	105°C	Variação	≈20°C	105°C	Variação
AMP	59,4	71,7	+20,7%	9,9	13,1	+32,1%
AM1 (45% CV)	59,0	65,4	+10,9%	10,7	12,6	+17,4%
AM0 (50% CV)	62,3	64,6	+3,6%	10,0	12,8	+28,0%
AM2 (60% CV)	50,5	66,6	+31,9%	8,8	12,6	+43,0%

4.3.14.3. Discussão dos resultados

Os resultados obtidos mostram que todas as argamassas obtiveram aumentos de resistência, tanto à compressão como à flexão, após terem sido expostas a 105°C durante 28 dias e com a idade de seis meses. Os aumentos de resistência foram mais significativos, quer à compressão, quer à flexão, para as argamassas AM2 (60% CV) e AMP.

Assim, em relação à resistência a temperaturas elevadas ao longo do tempo, pode-se afirmar que não há efeitos negativos em qualquer das argamassas. Os aumentos das resistências verificadas deve-se, muito provavelmente, a uma aceleração quer da hidratação do cimento, quer da reacção pozolânica. Esta afirmação está de acordo com a bibliografia consultada e referida em 2.2.3.3.

Efectivamente, além da argamassa de cimento, a que ganhou mais resistência foi a argamassa com 60% de cinzas, sendo esta, entre as argamassas com cinzas, a que apresentava maior quantidade de cinzas por reagir, como se apresenta em 4.4.

4.4. ESTUDO PETROGRÁFICO DAS ARGAMASSAS

Observaram-se e analisaram-se por microscopia electrónica de varrimento (MEV) amostras das quatro argamassas, com a idade de 200 dias. Todas as amostras foram estudadas, quer à superfície, quer a cerca de 3 mm de profundidade, tendo-se mostrado, ricas em sílica, alumina e cálcio, podendo conter quantidades menores de magnésio, ferro e álcalis. Esta composição está de acordo com a de uma argamassa cimentícia, com ou sem cinzas volantes. Para comparação entre as diferentes argamassas todos os espectros globais foram realizados por uma ampliação de 300.

A argamassa de referência AMP, sem cinzas volantes, mostra a superfície completamente invadida por carbonato de cálcio, facto bem patente no espectro global (Figura 4.48).

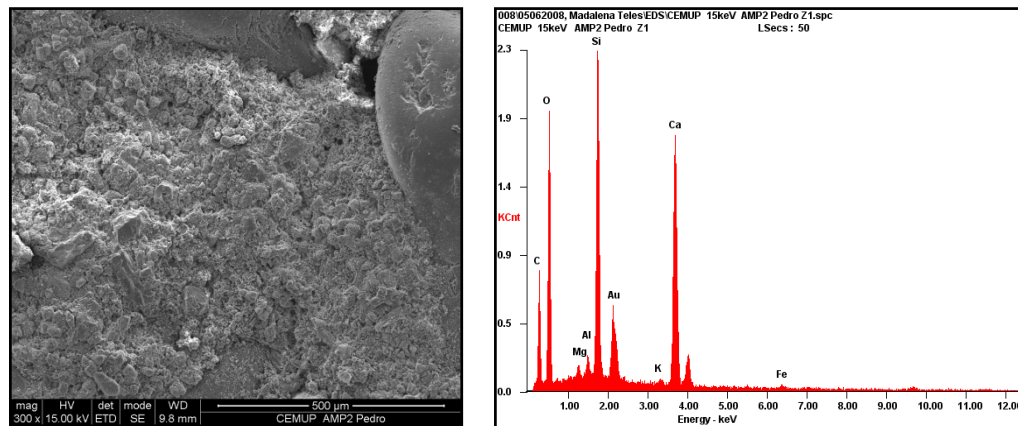


Figura 4.48 – Imagem e espectro global da superfície da argamassa de referência.

Na Figura 4.49 apresentam-se imagens de carbonato de cálcio com diferentes aspectos e um espectro, observados e analisados à superfície da argamassa.

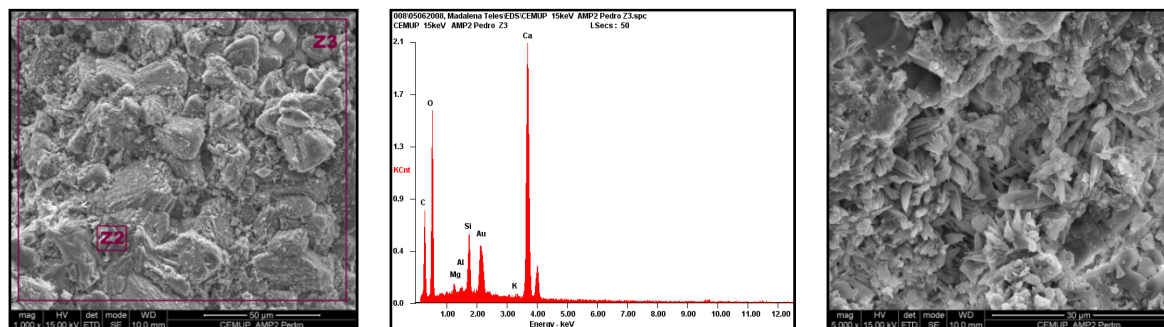


Figura 4.49 – Imagens e espectro de carbonato de cálcio à superfície da argamassa de referência.

Quando se observam amostras da argamassa padrão a cerca de 3 mm de profundidade, já não se consegue isolar o carbonato de cálcio e o espectro global mostra apenas pequena quantidade de carbono (Figura 4.50).

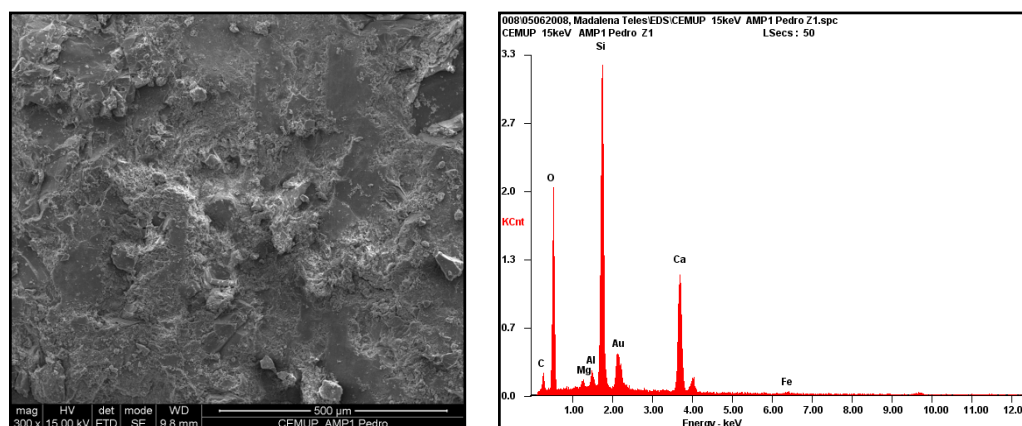


Figura 4.50 – Imagem e espectro global da argamassa de referência para cerca de 3 mm de profundidade.

Observou-se em seguida a argamassa com 45% de cinzas volantes à superfície, apresentando-se na Figura 4.51 a imagem e o espectro global. Tal como na argamassa padrão, a superfície desta argamassa mostra-se rica em carbonato de cálcio. Observam-se cinzas que ainda não reagiram, mas não em grandes quantidades.

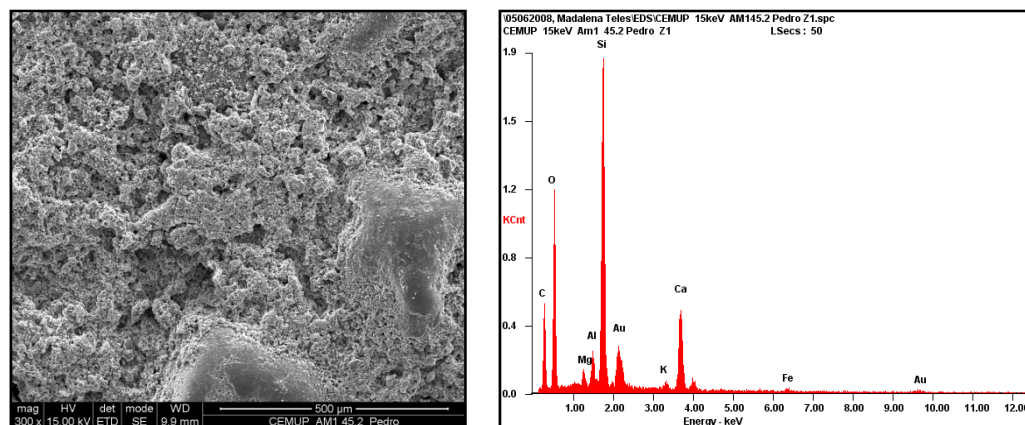


Figura 4.51 – Imagem e espectro global da superfície da argamassa com 45% de cinzas volantes.

Na Figura 4.52 apresentam-se imagens de carbonato de cálcio e um espectro. Numa das imagens são bem visíveis cinzas que ainda não reagiram.

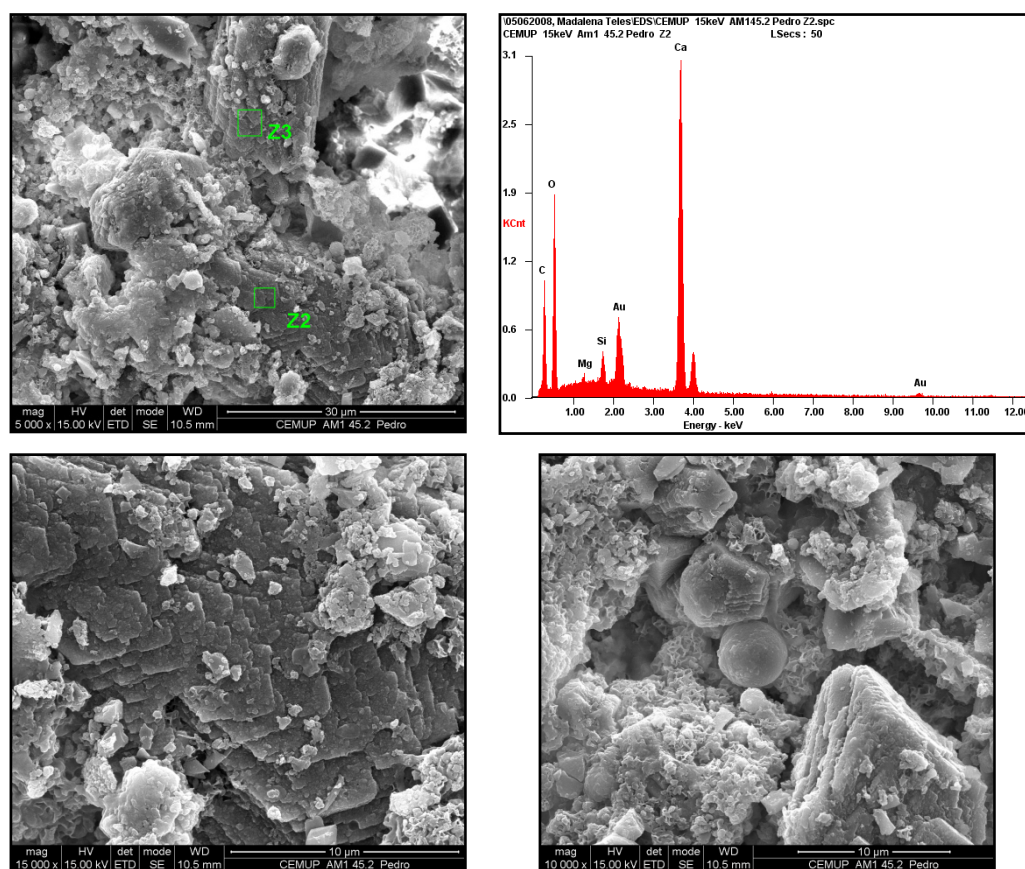


Figura 4.52 – Imagens e espectro de carbonato de cálcio e cinzas volantes à superfície da argamassa com 45% de cinzas.

Nas amostras da argamassa com 45% de cinzas volantes, a cerca de 3 mm de profundidade, já não se consegue isolar o carbonato de cálcio e o espectro global mostra apenas pequena quantidade de carbono (Figura 4.53).

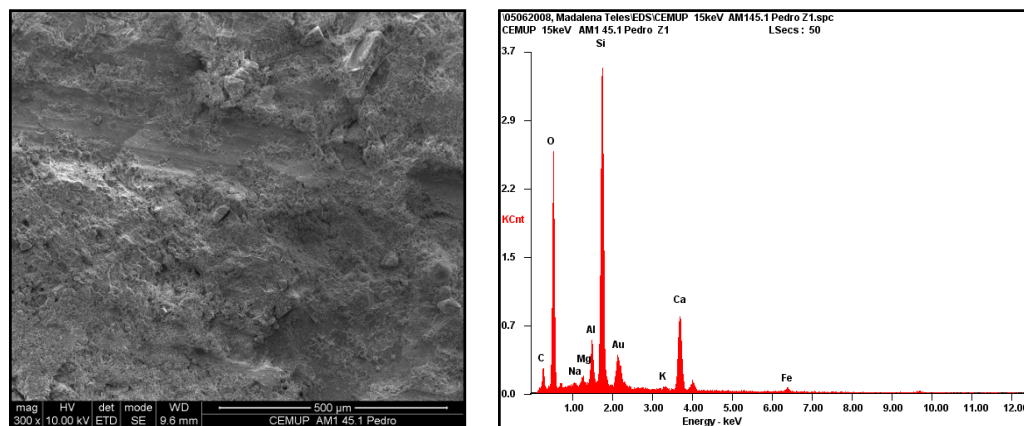


Figura 4.53 – Imagem e espectro global da argamassa com 45% de cinzas a cerca de 3 mm de profundidade.

Apesar de não ter qualquer significado, em termos de carbonatação da amostra, por se ter encontrado isolado, apresenta-se na Figura 4.54 uma imagem de carbonato de cálcio presente nesta amostra. Nesta imagem o carbonato de cálcio aparece em rosetas, figura não muito comum da calcite em materiais cimentícios, mas já anteriormente encontrada num betão por Mota Miranda (2006).

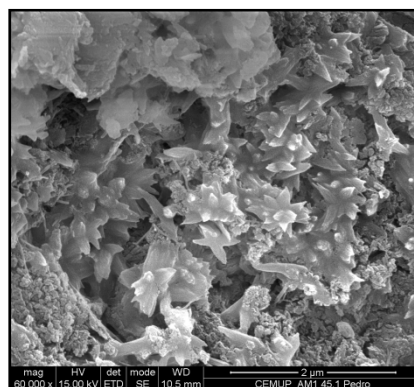


Figura 4.54 – Imagem de carbonato de cálcio a cerca de 3 mm de profundidade na argamassa com 45% de cinzas.

Apresenta-se na Figura 4.55 a imagem e o espectro global da argamassa com 50% de cinzas volantes, à superfície. Tal como as outras argamassas, mostra-se rica em carbonato de cálcio. Observam-se cinzas que ainda não reagiram, mas não em grandes quantidades.

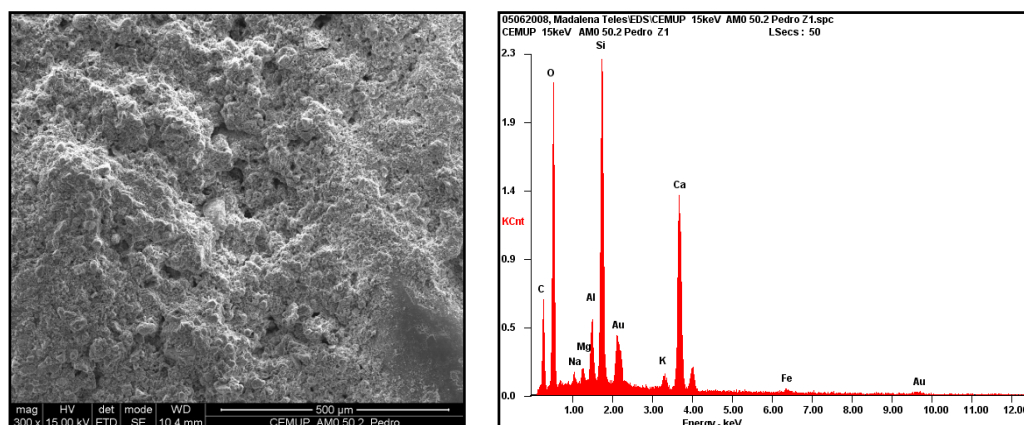


Figura 4.55 – Imagem e espectro global da superfície da argamassa com 50% de cinzas volantes.

Na Figura 4.56 apresentam-se imagens de carbonato de cálcio, sendo na imagem com maior ampliação visíveis cinzas que ainda não reagiram. Tal como na argamassa com 45% de cinzas volantes, não é significativa a quantidade deste tipo de cinzas.

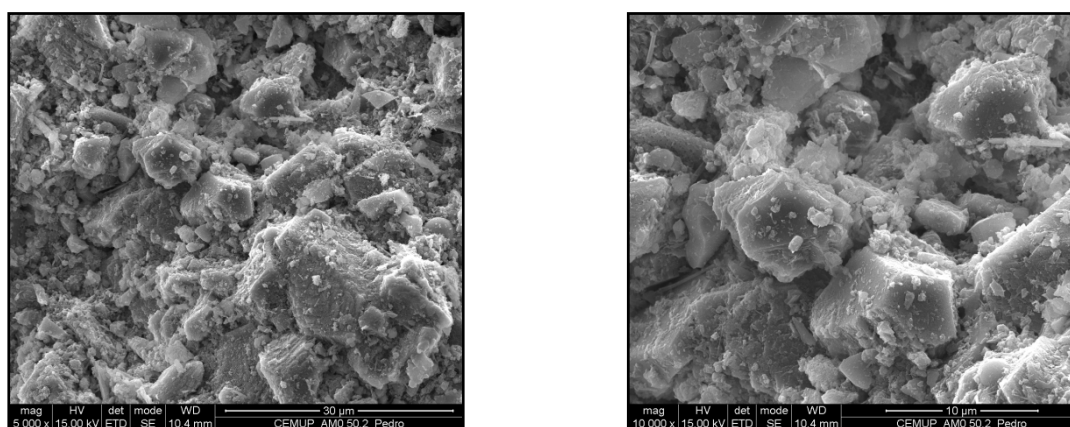


Figura 4.56 – Imagens de calcite e algumas cinzas na superfície da argamassa com 50% de cinzas volantes.

Nas amostras da argamassa com 50% de cinzas volantes, a cerca de 3 mm de profundidade, já não se consegue isolar o carbonato de cálcio e o espectro global mostra apenas pequena quantidade de carbono (Figura 4.57).

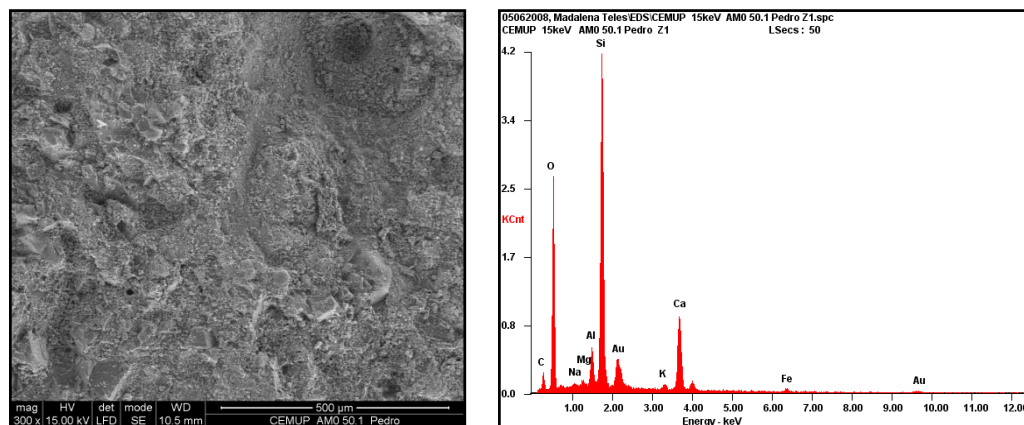


Figura 4.57 – Imagem e espectro global da superfície a cerca de 3 mm de profundidade da argamassa com 50% de cinzas volantes.

Observou-se em seguida a argamassa com 60% de cinzas volantes à superfície, apresentando-se na Figura 4.58 a imagem e o espectro global. Tal como na argamassa padrão, a superfície desta argamassa mostra-se rica em carbonato de cálcio. Observam-se cinzas que ainda não reagiram, mas não em grandes quantidades.

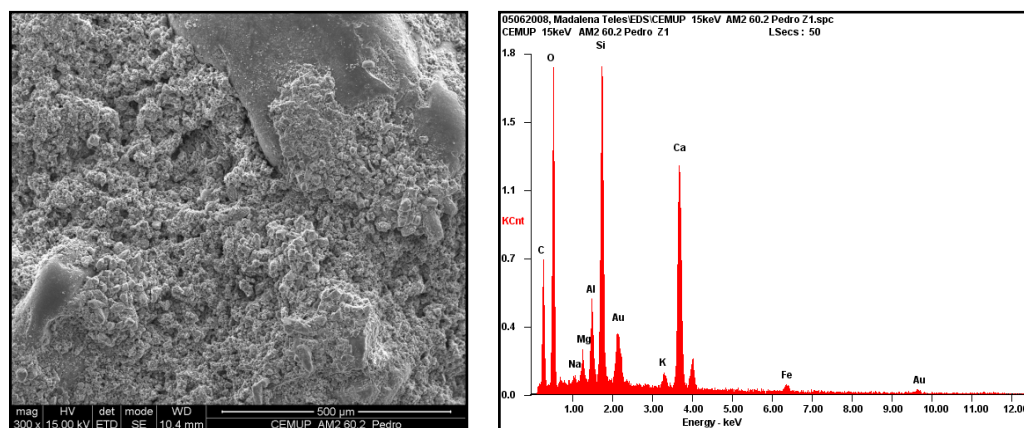


Figura 4.58 – Imagem e espectro global da superfície da argamassa com 60% de cinzas volantes.

A observação desta argamassa mostrou muito carbonato de cálcio à superfície, tal como as outras argamassas. No entanto, há uma grande diferença em relação às argamassas com 45% e 50% de cinzas volantes, sendo agora muito significativo o número de cinzas que ainda não reagiu. Na Figura 4.59 apresentam-se imagens de calcite, tendo uma um grande número de cinzas visíveis.

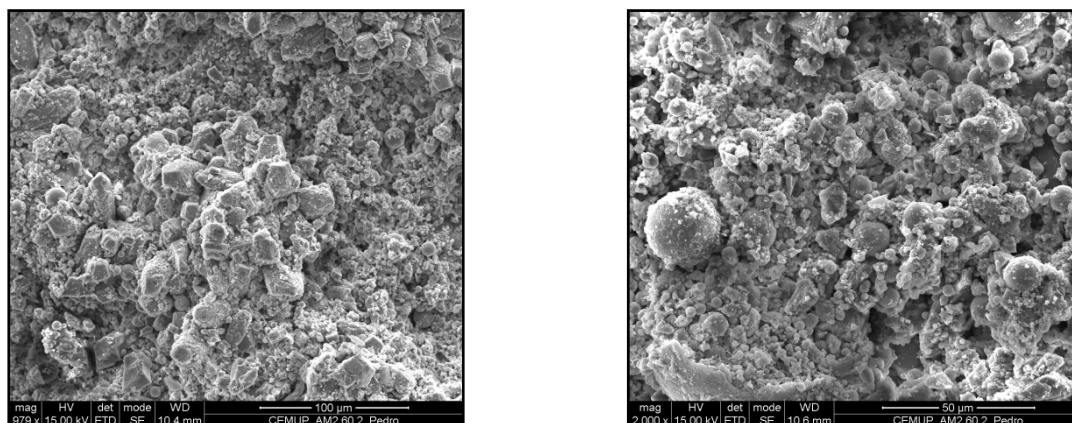


Figura 4.59 – Imagens de carbonato de cálcio e cinzas volantes na argamassa com 60% de cinzas.

Quando observadas e analisadas a cerca de 3 mm de profundidade as amostras da argamassa com 60% de cinzas volantes, não se consegue isolar o carbonato de cálcio e o espectro global mostra apenas pequena quantidade de carbono (Figura 4.60). O aspecto desta argamassa mostra ainda um revestimento mais pobre dos grãos de areia, essencialmente constituídos por sílica, sendo este facto bem patente no espectro global.

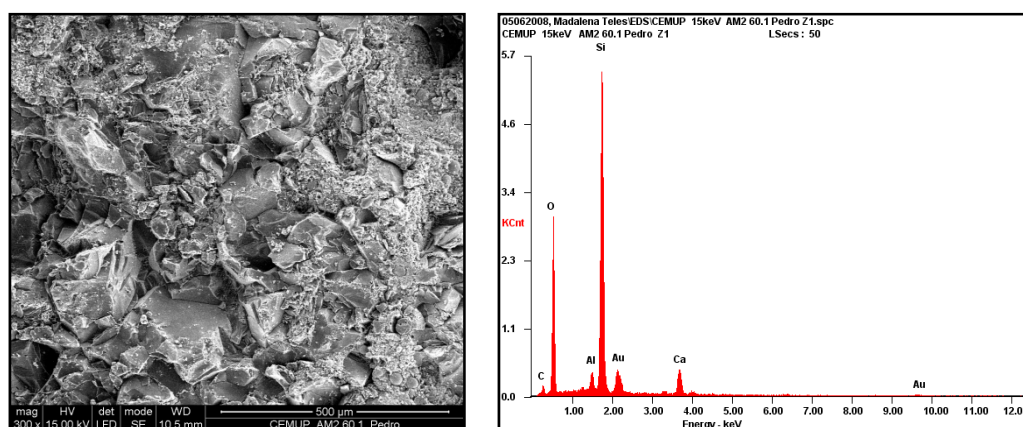


Figura 4.60 – Imagem e espectro global da superfície a cerca de 3 mm de profundidade da argamassa com 60% de cinzas volantes.

Na superfície a cerca de 3 mm de profundidade, a quantidade de cinzas que não reagiram parece ainda ser maior do que à superfície (Figura 4.61).

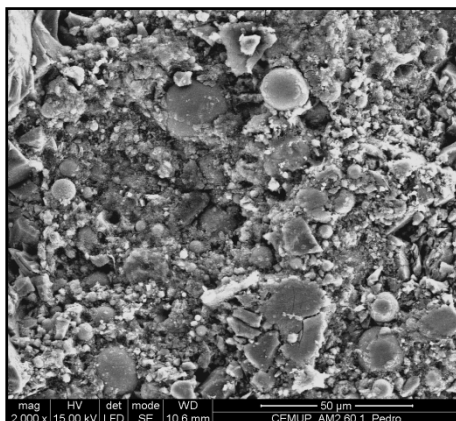


Figura 4.61 – Imagem da superfície a cerca de 3 mm de profundidade da argamassa com 60% de cinzas, mostrando uma grande quantidade de cinzas volantes.

A análise deste estudo petrográfico permite afirmar que com 200 dias de idade as argamassas com teores de cinzas volantes de 45% e 50% tinham uma estrutura muito idêntica à das argamassas de referência, enquanto que a que contém 60% mostra que as areias não se apresentam tão bem envolvidas pela pasta de ligante, exibindo ainda quantidades elevadas de cinzas por reagir.

5

CONCLUSÃO E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

No trabalho que agora se conclui procurou-se avaliar a influência da substituição de cimento por teores elevados de cinzas volantes (45%, 50% e 60%) em diferentes propriedades de argamassas, nomeadamente: tempo de presa, resistências mecânicas (compressão, flexão, abrasão e corte), propriedades relacionadas com a caracterização do meio poroso (porosidade livre, absorção de água por capilaridade, evaporação e penetração de água sob pressão), propriedades relacionadas com a durabilidade (resistência a ciclos cristalização/dissolução, profundidade de carbonatação, profundidade de penetração de cloretos, coeficiente de difusão aos cloretos, resistividade e resistência a temperaturas elevadas).

Apresenta-se de seguida uma síntese das conclusões mais relevantes.

As cinzas volantes retardam o tempo início de presa, tanto mais quanto maior o teor em cinzas. O intervalo de tempo entre o início e fim de presa mantém-se inalterado.

As resistências iniciais das argamassas com cinzas são inferiores em relação à argamassa padrão. O facto de se ter elevadas percentagens de substituição torna ainda mais evidente o lento desenvolvimento das resistências, especialmente nas primeiras idades.

No entanto, as argamassas com teores de 45% e 50% de cinzas volantes apresentam a longo prazo (sete meses) resistências iguais ou superiores à argamassa de referência, enquanto que as resistências da argamassa com 60% de cinzas são ainda inferiores, para a mesma idade.

Verifica-se que o crescimento das resistências, relativamente à argamassa padrão, é menor nas resistências à compressão do que nas resistências à flexão.

Os valores da abrasão, quando calculados pelo ensaio na máquina de Amsler-Laffon não mostram diferenças significativas entre as argamassas.

As argamassas com cinzas volantes apresentam valores significativamente menores de porosidade livre do que a argamassa padrão. Entre as argamassas com cinzas, as que apresentam teores de 45% e 50% têm menores porosidades livres do que a de 60%.

Em relação à absorção de água por capilaridade, verifica-se que a argamassa padrão absorve maior quantidade de água e mais rapidamente do que as argamassas com cinzas. Entre estas, a que absorve maior quantidade de água e com maior velocidade é a que tem 60% de cinzas.

Analisando as alturas e tipos de superfície dos provetes utilizados no ensaio de absorção de água por capilaridade, verifica-se que se a altura for inferior a 40 mm tem influência nos resultados obtidos

e que o tipo de superfície por onde a água penetra (moldada ou serrada) também condiciona os resultados.

O ensaio de evaporação permitiu verificar que a argamassa de referência é a que mais rapidamente perde água à superfície, no entanto é a que mais tempo retém a água absorvida. Entre as argamassas com cinzas a de 60% é a que apresenta um comportamento mais próximo da argamassa padrão, enquanto que as outras duas, embora demorando mais tempo a evaporar a água à superfície, permanecem menos tempo com a água absorvida.

Também se verificou que a altura dos provetes tem influência nos resultados do ensaio.

O ensaio de penetração de água sob pressão apresentou resultados aparentemente pouco coerentes, pelo que se deve repetir, para uma idade superior a 90 dias e após calibração do equipamento de ensaio.

Em relação ao ensaio de envelhecimento por sais, as argamassas com cinzas mostraram uma maior degradação da superfície.

As profundidades de carbonatação são maiores nas argamassas com cinzas do que na argamassa padrão, aumentando com as percentagens de cinzas. Apesar da aparente coerência destes resultados, considera-se que o ensaio deve ser repetido, uma vez que se trata de uma câmara de carbonatação nova, sem ensaios comparativos com outras câmaras e que após dois meses de carbonatação acelerada a argamassa de referência não se encontrava minimamente carbonatada, facto muito improvável.

Os resultados obtidos mostram, em relação à profundidade de penetração dos cloretos, valores mais elevados para a argamassa padrão e para a argamassa com 60% de cinzas. As argamassas com 45% e 50% de cinzas volantes apresentam valores semelhantes e muito inferiores aos das outras duas.

Em relação aos coeficientes de difusão, calculados com base nessas profundidades, os resultados são semelhantes.

Em relação a estes resultados, pode-se concluir que argamassas com teores de cinzas entre 45% e 50% melhoram muito estas propriedades.

O cálculo das resistividades eléctricas mostrou que todas as argamassas com cinzas volantes apresentam um risco de corrosão baixo ou baixo a moderado, enquanto que a argamassa padrão exhibe um risco elevado. Este ensaio deve ser confirmado, utilizando uma sonda de Wenner, uma vez que permite obter directamente o valor da resistividade, aferindo todo o ensaio.

Finalmente, a resistência a temperaturas elevadas mostrou-se satisfatória para todas as argamassas.

As análises petrográficas das argamassas revelaram em todas as camadas superficiais de todos os provetes, quantidades muito significativas de carbonato de cálcio. No entanto, a cerca de 3 mm de profundidade não se conseguiu individualizar calcite nos referidos provetes. As argamassas com 60% de cinzas, contrariamente às restantes argamassas, mostraram um fraco envolvimento da areia pela pasta de ligante e ainda, quantidades muito elevadas de cinzas por reagir.

Analisando globalmente o resultado de todos os ensaios, as argamassas com teores de cinzas entre 45% e 50 % mostram um bom comportamento em relação à absorção e evaporação de água. Absorvem menos água que as argamassas de cimento e libertam-na mais rapidamente. Esta propriedade torna-as adequadas a serem utilizadas como argamassas de revestimento.

Em relação ao emprego destas argamassas como argamassas de reparação de betão com corrosão das armaduras, é necessário efectuar estudos adicionais. Em primeiro lugar, esclarecer o

aspecto da profundidade de carbonatação, que não foi conclusivo no presente trabalho e em relação ao qual as opiniões dos autores consultados divergem.

Embora, não haja controvérsia em relação ao facto de as cinzas volantes melhorarem a resistência à corrosão por penetração de cloretos, pensa-se que a aferição do ensaio utilizado é também importante.

Sobre o prosseguimento dos estudos refere-se:

- A avaliação da durabilidade das argamassas com cinzas, utilizando provetes com armaduras embebidas;
- A avaliação do comportamento das argamassas face a reacções expansivas, quer reacções sulfáticas, quer reacções álcalis-agregado.

BIBLIOGRAFIA

- ACI 222R-01 (2003). *Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, Part I*. ACI Manual of Concrete Practice, Part 1 – Materials and General Properties of Concrete, USA, Ed. ACI, 41 pp.
- ACI Committee 232 (1996). *Use of fly ash in concrete*. ACI committee report 232.2R-96, ACI, April, pp. 34.
- Aïtcin, Pierre-Claude (1998). *High-performance concrete*. Modern concrete technology 5, E&FN SPON, London and New York.
- Al-Amoudi, O. S. B., *et al.* (1993). *Prediction of long-term corrosion resistance of plain and blended cement concretes*. ACI Materials Journal, 90, No. 6, pp. 564-71.
- Alonso, J. L., Wesche, K. (1991). *Characterization of fly ash, Fly ash in concrete: properties and performance*. Report of technical committee 67-FAB – use of fly ash in building, RILEM, K. Wesche ed., E&FN SPON, pp. 3-23.
- Andrade, C., Alonso, C., Sarria, J. (2002). *Corrosion Rate Evolution in the Concrete Structures Exposed to the Atmosphere*. Cement & Concrete Composites, Vol. 24, Detroit, pp. 55-64.
- ASTM C109 (1998). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Vol. 04-01, Philadelphia.
- ASTM C150 (1998). *Standard specification for Portland cement*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Volume 04.01, November, pp. 140-144, Philadelphia.
- ASTM C618 (1998). *Standard specification for coal fly ash and raw calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete*. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, Volume 04.02, February, pp. 301-303, Philadelphia.
- Begonha, A. (2001). *Meteorização do granito e deteriorações da pedra em monumentos e edifícios da cidade do Porto*, FEUP, Porto, 445 pp.
- Bentur, A., Jaegermann, C. (1991). *Effect of curing and composition on the properties of the outer skin of concrete*. Journal of Materials in Engineering, 3, No. 4, pp. 252-62.
- Berg, W. Von, Kukko, H. (1991). *Fresh mortar and concrete with fly ash, Fly ash in concrete – properties and performance*. Report of technical committee 67-FAB – use of fly ash in building, RILEM, K. Wesche ed., E&FN SPON, pp. 24-41.
- Berry, E. E., Malhotra, V. M. (1982). *Fly Ash for Use in Concrete – A Critical Review*. ACI Journal, 2(3):59-73.
- Bier, Th. A. (1987). *Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement paste*. Materials Research Society Symposium, 85, pp. 123-34.
- Brunauer, S., Emmett, P. H., Teller, E. (1938). *Adsorption of gases in multi-molecular layers*. J. Amer. Chem. Soc., 60, pp. 309-19.
- Buil, M., Olivier, J.-P. (1992). *Conception des bétons: La structure poreuse*. La Durabilité des Bétons, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, p. 57-105.
- Camões, A. (2002). *Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes*. Dissertação apresentada à Universidade do Minho para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil. Universidade do Minho, 487 pp.

- Cao, H. T. *et al.* (1994). *Corrosion behaviours of steel embedded in fly ash blended cements*. Durability of Concrete, Ed. Malhotra, V. M., ACI SP-145, pp. 215-27 (Detroit, Michigan).
- CUR Report (1991). *Fly ash as addition to concrete*. Centre for Civil Engineering Research and Codes, Report 144, 99 pp. (Gouda, The Netherlands).
- Currie, R. J. (1986). *Carbonation depths in structural-quality concrete*. Building Research Establishment Report, 19 pp. (Watford, U.K.).
- Ellis Jr., W. E., Rigg, E. H., Butler, W. B. (1991). Comparative results of utilization of fly ash, silica fume and GGBFS in reducing the chloride permeability of concrete. In *Durability of Concrete*, ACI SP-126, pp. 443-58 (Detroit, Michigan).
- Fraay, A. L. A., Bijen, J. M., Haan, Y. M. (1989). *The reaction of fly ash in concrete: a critical examination*. Cement and Concrete Research, 19, No. 2, pp. 235-46.
- Hall, C. (1989). *Water sorptivity of mortars and concretes: a review*. Mag. Concr. Res., 41, No. 147, pp. 51-61.
- Halstead, W. (1986). *Use of fly ash in concrete*. Transportation research board publication n° 127, Washington, pp. 66.
- Hammecker, C. (1993). *Importance des transferts d'eaux dans la dégradation des pierres en œuvre*. Tese de doutoramento, Université Louis Pasteur de Strasbourg, Strabourg, 254 pp.
- Helmuth, R. (1987). *Fly Ash in Cement and Concrete*, 203 pp. (PCA, Skokie, Ill).
- http://www.iapmei.pt/resources/download/5_OPMNM.pdf. 23/02/2008.
- IStructE (1992). The Institution of Structural Engineers. *Structural effects of alkali-silica reaction – Technical guidance on the appraisal of existing structures*, London, 48 pp.
- Jalali, Said (1991). *A study of factors affecting the mechanical behaviour of lime-fly ash mixtures*. Coventry Polytechnic, Ph.D. Thesis, February, pp. 411.
- Joshi, R. C. (1981). *Lime-Fly Ash and Cement Fly Ash Stabilized Aggregates and Soils for Pavement and Dam Construction*. Res. Report No. CE81-5, The University of Calgary, Department of Civil Engineering (July).
- Joshi, R. C. (1987). *Effect of a Sub-bituminous Fly Ash and its Properties on Sulphate Resistance of Sand Cement Mortars*. J. Durability of Building Materials, 4:271-286.
- Joshi, R. C., Day, R. L., Langan, B. W., Ward, M. A. (1987). *Strength and Durability of Concrete with High Proportions of Fly Ash and other Mineral Admixtures*. J. Durability of Building Materials, 4:253-270.
- Joshi, R. C., Lam, D. T. (1987). *Sources of Self-Hardening Properties in Fly Ashes*. Materials Research Society Proc., MRS, 86:183-184, Pittsburg, USA.
- Joshi, R. C., Lohtia, R. P. (1997). *Fly ash in concrete: production, properties and uses*. Advances in Concrete Technology, Volume 2, V. M. Malhotra ed., Gordon and Breach Science Publishers, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 269.
- Joshi, R. C., Lohtia, R. P., Salam, M. A. (1993). *High Strength Concrete with High Volumes of Canadian Sub-bituminous Coal Fly Ash*. Third Int'l. Symp. on Utilization of High Strength Concrete, Lillehammer, Norway.

- Joshi, R. C., Marsh, B. K. (1987). *Some Physical, Chemical and Mineralogical Properties of Some Canadian Fly Ashes*. Materials Research Society, Proc., MRS 86:113-126, Pittsburg, USA.
- Joshi, R. C., Nagaraj, T. S. (1987). *Fly Ash Utilization for Soil Improvement*. Proc., Environmental Geotechnical and Problematic Soils and Rocks, pp. 15-24, AIT Bangkok, Thailand, A. A. Balkema Publications Rotterdam, The Netherlands, sponsored by the AIT Bangkok, S.E. Asia Geotech. Soc.
- Langan, B. W., Joshi, R. C., Ward, M. A. (1983). *Strength and Durability of Concretes Containing 50% Portland Cement Replacement by Fly Ash and Other Materials*. Proceedings First Int'l. Conf. on the Use of Fly Ash, Silica Fume, Slag and Other Mineral By-products in Canada, ACI SP-79, Montebello, Canada (July-Aug.).
- Lewandowski, R. (1983). *Effect of different fly-ash qualities and quantities on the properties of concrete*. Betonwerk + Fertigteil, Nos. 1, 2 and 3, 18 pp.
- LNCE E 391 (1993). *Betões – Determinação da Resistência à Carbonatação*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNCE E 396 (1993). *Betões – Determinação da Resistência à Abrasão*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNCE E 463 (2004). *Betões – Determinação do coeficiente de difusão dos cloretos. Ensaio de migração em regime não estacionário*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- LNCE E 64 (1979). *Cimentos – Determinação da massa volúmica*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Malhotra, V. M. (1993). *Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk ash in concrete: a review*. Concrete International, ACI, April, pp. 23-28.
- Malhotra, V. M. (1999). *Making concrete “greener” with fly ash*. Concrete International, ACI, May, pp. 61-66.
- Malhotra, V. M., Mehta, P. Kumar (1996). *Pozzolanic and cementitious materials*. Advances in Concrete Technology, Volume 1, V. M. Malhotra ed., Gordon and Breach Science Publishers, Ottawa, Ontario, Canada, pp. 191.
- Malhotra, V. M., Ramezaniapour, A. A. (1994). *Fly ash in concrete – 2nd edition*. CANMET – Canada Centre for Mineral and Energy Technology, pp. 307.
- Marsh, B. K., Day, R. L., Bonner, D. G. (1986). *Strength gain and calcium hydroxide depletion in hardened cement pastes containing fly ash*. Mag. Concr. Res., 38, No. 134, pp. 23-9.
- Mazzara, F., Costa, U. (1979). *Aspects of the pozzolanic activity and properties of pozzolanic cements*. Il Cemento, 76, N° 1, pp. 3-18.
- Mehta, P. Kumar (1985). *Influence of fly ash characteristics on the strength of Portland fly ash mixtures*. Cement and concrete research, Elsevier Science Ltd., Volume 15, Number 4, pp. 669-674.
- Milard, G., Gowers, R. (1992). *Resistivity Assessment of In-Situ Concrete: The Influence of Conductive and Resistive Layers*. Proc. Instit. Civil Engin. Struct. & Buildings, 94, pp. 389-396.
- Mota Miranda, A. (2006). *Influência da proximidade do mar em estruturas de betão*. Tese do Mestrado em Reabilitação do Património Edificado, FEUP, Porto, 204 pp.
- Neville, Adam M. (1995). *Properties of concrete, Fourth edition*. Longman Group Limited, England, pp. 844.

Nixon, P. J. et al. (1986). *The effect of pfa with a high total alkali content on pore solution composition and alkali-silica reaction*. Mag. Concr. Res., 38, No. 134, pp. 30-5.

NP EN 12390-8 (2003). *Ensaio do betão endurecido, Parte 8: Profundidade de penetração da água sob pressão*. Instituto Português da Qualidade, 8 pp.

NP EN 1504-1 (2006). *Produtos e sistemas para a protecção e reparação de estruturas de betão. Definições, requisitos, controlo da qualidade e avaliação da conformidade. Parte 1: Definições*. Instituto Português da Qualidade, 12 pp.

NP EN 196-1 (1996). *Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*. Instituto Português da Qualidade, 26 pp.

NP EN 196-2 (1996). *Métodos de ensaio de cimentos – Parte 2: Análise química de cimentos*. Instituto Português da Qualidade, 32 pp.

NP EN 196-21 (1996). *Métodos de ensaio de cimentos – Parte 3: Determinação do teor em cloretos, dióxido de carbono e álcalis no cimento*. Instituto Português da Qualidade, 21 pp.

NP EN 196-3 (1996). *Métodos de ensaio de cimentos – Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade*”, Instituto Português da Qualidade, 11 pp.

NP EN 196-6 (1996). *Métodos de ensaio de cimentos – Parte 6: Determinação da finura*. Instituto Português da Qualidade, 17 pp.

NP EN 197-1 (2001). *Cimento – Parte 1: Composição, especificações e critérios de conformidade para cimentos correntes*. Instituto Português da Qualidade, 35 pp.

NP EN 450-1 (2006). *Cinzas volantes para betão – Definições, exigências e controlo de qualidade*. Instituto Português da Qualidade, 12 pp.

NP EN 450-2 (1995). *Métodos de ensaio de cinzas volantes - Parte 2: Determinação da finura por peneiração húmida*. Instituto Português da Qualidade, 8 pp.

NP EN 451-1 (1995). *Métodos de ensaio de cinzas volantes - Parte 1: Determinação do teor de óxido de cálcio livre*. Instituto Português da Qualidade, 7 pp.

Odler, I. (1991). *Final report of Task Group 1, 68-MMH Technical Committee on Strength of Cement*. Materials and Structures, 24, No. 140, pp. 143-57.

Papadakis, V. G., Fardis, M. N., Vayenas, C. G. (1992). *Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation*. Materials and Structures, 25, No. 149, pp. 293-304.

Papayianni, J., Valiasis, T. (1991). *Residual mechanical properties of heated concrete incorporating different pozzolanic materials*. Materials and Structures, 24, No. 140, pp 115-21.

Perry, C., Day, R. L., Joshi, R. C., Langan, B. W., Gillott, J. E. (1987). *The Effectiveness of Twelve Canadian Fly Ashes in Suppressing Expansion Due to Alkali-Silica Reaction*. Proc., 7th Int'l. Conf. on Alkali-Aggregate Reactions, pp. 93-97, Ottawa.

Ramachandran, V. S. (1976). *Calcium Chloride in Concrete*. Applied Science Publishers, London.

Ramachandran, V. S. (1995). *Concrete Admixtures Handbook, Properties, Science and Technology, Second Edition*. Institute for Research in Construction, National Research Council Canada, Ottawa, Ontario, Canada. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, U.S.A., 1153 pp.

- Ramos, S. (2001). *Caracterização de argamassas*. Relatório de Estágio, Licenciatura em Matemática Aplicada à Tecnologia, Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção, Departamento de Matemática Aplicada da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 95 pp.
- Ribeiro, M. (2004). *Argamassas cimentícias modificadas com adjuvantes poliméricos – Composição e características*. Dissertação elaborada no LNEC para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre IST e o LNEC, Instituto Superior Técnica, Lisboa, 604 pp.
- Rodrigues, M. P. (2004). *Argamassas de revestimento para alvenarias antigas – contribuição para o estudo da influência dos ligantes*. Tese apresentada para a obtenção do grau académico de Doutor em Engenharia Civil na especialidade de Reabilitação do Património Edificado, pela Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, 491 pp.
- Rodway, L. E., Fedirko, W. M. (1992). *Setting Times and Compressive Strength of Superplasticized High Volume Fly Ash Structural Concrete*. Proc. Fourth CANMET/ACI Int'l. Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, pp. 257-266, Istanbul, Turkey (May).
- Salta, M. (1999). *Prevenção da Corrosão no Betão Armado*. Programa de Investigação apresentado a concurso de acesso à categoria de Investigador-Coordenador do LNEC, Lisboa, Abril.
- Schiessl, P., Raupach, N. (1989). *Influence of blending agents on the rate of corrosion of steel in concrete, in Durability of Concrete: Aspects of Admixtures and Industrial By-products*. 2nd International Seminar, Swedish Council for Building Research, pp. 205-14 (June).
- Schubert, P., Wesche, K. (1974). *Einfluss der Karbonatisierung auf die Eigenschaften von Zementmörteln*. Research Report No. F16, 28 pp. (Institut für Bauforschung BWTH Aachen, Nov.).
- Sousa Coutinho, A. (1988). *Fabrico e Propriedades do Betão, Volume I*. LNEC, Lisboa, 401 pp.
- Swamy, R. N. (1993). *Fly ash and slag: standards and specifications – help or hindrance?*. Materials and structures / Matériaux et constructions, Volume 26, pp. 600-613.
- Teles, M. (2002). *Reflexões sobre a composição de argamassas*. A intervenção no património. Práticas de conservação e reabilitação, FEUP e DGEMN, Porto, pp. 515-529.
- Teles, M. (2007). *Patologia do Betão*. Mestrado Integrado em Materiais e Processos de Construção 2007/2008. In Conteúdos da Disciplina de Patologia dos Materiais, FEUP, 237 pp.
- Teles, M., Begonha, A. (1997). *Patologia da Pedra*. FEUP, Porto, 63 pp.
- Thomas, M. D. A., Matthews, J. D. (1992). *Carbonation of fly ash concrete*. Mag. Concr. Res., 44, No. 160, pp. 217-28.
- UNFCCC (2007). *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Subsidiary Body for Implementation, Twenty-seventh session Bali, 3–11 December 2007, 28 pp. <http://unfccc.int/resource/docs/2007/sbi/eng/30.pdf>. 25/02/2008.
- USEPA (2007). *United States Environmental Protection Agency*. Coal Fly Ash. <http://www.epa.gov/jtr/comm/cfa.htm>. 20/03/2008.
- Von Fay, K. F., Pierce, J. S. (1989). *Sulphate Resistance of Concretes with Various Fly Ashes*. ASTM Standardization News, pp. 32-77 (Dec.).
- Wesche, K. (Ed.) (1991). *Fly Ash in Concrete*. RILEM Report of Technical Committee 67-FAB, section 3.2.5 by J. Bijen, p. 103 (E&FN Spon, London).

A1

ANEXO 1 – RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO E À FLEXÃO

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes ensaiados à flexão e à compressão, em cada idade. Os valores que apresentam um desvio superior a 10% relativamente à média não foram considerados e encontram-se marcados a vermelho.

Quadro A1.1 – Resistências à compressão e à flexão aos dois dias.

Ref. Provete	Massa Provete (g)	Ensaio	Valor (kgf)	Resultado (MPa)
AMP (1)	594,4	Flexão	265	6,09
AMP (2)	590,2	Flexão	250	5,75
AMP (3)	592,2	Flexão	295	6,78
AMP (1.1)		Comp.	4900	30,04
AMP (1.2)		Comp.	5000	30,66
AMP (2.1)		Comp.	5000	30,66
AMP (2.2)		Comp.	4900	30,04
AMP (3.1)		Comp.	4800	29,43
AMP (3.2)		Comp.	4800	29,43
AM1 - 45% CV (1)	599,0	Flexão	185	4,25
AM1 - 45% CV (2)	598,7	Flexão	180	4,14
AM1 - 45% CV (3)	594,3	Flexão	175	4,02
AM1 - 45% CV (1.1)		Comp.	2800	17,17
AM1 - 45% CV (1.2)		Comp.	2700	16,55
AM1 - 45% CV (2.1)		Comp.	3000	18,39
AM1 - 45% CV (2.2)		Comp.	2900	17,78
AM1 - 45% CV (3.1)		Comp.	2800	17,17
AM1 - 45% CV (3.2)		Comp.	3000	18,39
AM0 - 50% CV (1)	588,5	Flexão		
AM0 - 50% CV (2)	601,1	Flexão	180	4,14
AM0 - 50% CV (3)	602,8	Flexão	185	4,25
AM0 - 50% CV (1.1)		Comp.	2700	16,55
AM0 - 50% CV (1.2)		Comp.	2450	15,02
AM0 - 50% CV (2.1)		Comp.	2600	15,94
AM0 - 50% CV (2.2)		Comp.	2400	14,72
AM0 - 50% CV (3.1)		Comp.	2500	15,33
AM0 - 50% CV (3.2)		Comp.	2400	14,72
AM2 - 60% CV (1)	593,2	Flexão	130	2,99
AM2 - 60% CV (2)	593,9	Flexão	130	2,99
AM2 - 60% CV (3)	591,7	Flexão	135	3,10
AM2 - 60% CV (1.1)		Comp.	2050	12,57
AM2 - 60% CV (1.2)		Comp.	1950	11,96
AM2 - 60% CV (2.1)		Comp.	1950	11,96
AM2 - 60% CV (2.2)		Comp.	1950	11,96
AM2 - 60% CV (3.1)		Comp.	1950	11,96
AM2 - 60% CV (3.2)		Comp.	1900	11,65

Quadro A1.2 – Resistências à compressão e à flexão aos sete dias.

Ref. Provete	Massa Provete (g)	Ensaio	Valor (kgf)	Resultado (MPa)
AMP (1)	596,1	Flexão	365	8,39
AMP (2)	591,4	Flexão	320	7,36
AMP (3)	600,3	Flexão	350	8,05
AMP (1.1)		Comp.	7000	42,92
AMP (1.2)		Comp.	6900	42,31
AMP (2.1)		Comp.	6100	37,40
AMP (2.2)		Comp.	6700	41,08
AMP (3.1)		Comp.	6950	42,61
AMP (3.2)		Comp.	7000	42,92
AM1 - 45% CV (1)	597,2	Flexão	290	6,67
AM1 - 45% CV (2)	604,9	Flexão	250	5,75
AM1 - 45% CV (3)	599,3	Flexão	235	5,40
AM1 - 45% CV (1.1)		Comp.	4500	27,59
AM1 - 45% CV (1.2)		Comp.	4500	27,59
AM1 - 45% CV (2.1)		Comp.	4400	26,98
AM1 - 45% CV (2.2)		Comp.	4200	25,75
AM1 - 45% CV (3.1)		Comp.	4200	25,75
AM1 - 45% CV (3.2)		Comp.	4200	25,75
AM0 - 50% CV (1)	600,7	Flexão	245	5,63
AM0 - 50% CV (2)	594,3	Flexão	240	5,52
AM0 - 50% CV (3)	598,3	Flexão	250	5,75
AM0 - 50% CV (1.1)		Comp.	3700	22,69
AM0 - 50% CV (1.2)		Comp.	4000	24,53
AM0 - 50% CV (2.1)		Comp.	3800	23,30
AM0 - 50% CV (2.2)		Comp.	3800	23,30
AM0 - 50% CV (3.1)		Comp.	3900	23,91
AM0 - 50% CV (3.2)		Comp.	3650	22,38
AM2 - 60% CV (1)	596,2	Flexão	175	4,02
AM2 - 60% CV (2)	600,6	Flexão	175	4,02
AM2 - 60% CV (3)	598,4	Flexão	190	4,37
AM2 - 60% CV (1.1)		Comp.	3000	18,39
AM2 - 60% CV (1.2)		Comp.	2900	17,78
AM2 - 60% CV (2.1)		Comp.	3000	18,39
AM2 - 60% CV (2.2)		Comp.	3000	18,39
AM2 - 60% CV (3.1)		Comp.	2900	17,78
AM2 - 60% CV (3.2)		Comp.	3000	18,39

Quadro A1.3 – Resistências à compressão e à flexão aos 28 dias.

Ref. Provete	Massa Provete (g)	Ensaio	Valor (kgf)	Resultado (MPa)
AMP (1)	606,1	Flexão	360	8,28
AMP (2)	607,0	Flexão	390	8,97
AMP (3)	606,6	Flexão	410	9,43
AMP (1.1)		Comp.	8500	52,12
AMP (1.2)		Comp.	8300	50,89
AMP (2.1)		Comp.	9200	56,41
AMP (2.2)		Comp.	9400	57,63
AMP (3.1)		Comp.	7500	45,98
AMP (3.2)		Comp.	8600	52,73
AM1 - 45% CV (1)	611,3	Flexão	330	7,59
AM1 - 45% CV (2)	607,6	Flexão	330	7,59
AM1 - 45% CV (3)	604,5	Flexão	330	7,59
AM1 - 45% CV (1.1)		Comp.	6800	41,69
AM1 - 45% CV (1.2)		Comp.	6400	39,24
AM1 - 45% CV (2.1)		Comp.	6600	40,47
AM1 - 45% CV (2.2)		Comp.	6800	41,69
AM1 - 45% CV (3.1)		Comp.	6800	41,69
AM1 - 45% CV (3.2)		Comp.	6750	41,39
AM0 - 50% CV (1)	595,2	Flexão	310	7,13
AM0 - 50% CV (2)	600,7	Flexão	350	8,05
AM0 - 50% CV (3)	598,1	Flexão	300	6,90
AM0 - 50% CV (1.1)		Comp.	6000	36,79
AM0 - 50% CV (1.2)		Comp.	6000	36,79
AM0 - 50% CV (2.1)		Comp.	5700	34,95
AM0 - 50% CV (2.2)		Comp.	5600	34,34
AM0 - 50% CV (3.1)		Comp.	5600	34,34
AM0 - 50% CV (3.2)		Comp.	5400	33,11
AM2 - 60% CV (1)	612,2	Flexão	245	5,63
AM2 - 60% CV (2)	609,7	Flexão	290	6,67
AM2 - 60% CV (3)	596,6	Flexão	240	5,52
AM2 - 60% CV (1.1)		Comp.	4800	29,43
AM2 - 60% CV (1.2)		Comp.	4600	28,20
AM2 - 60% CV (2.1)		Comp.	4900	30,04
AM2 - 60% CV (2.2)		Comp.	4700	28,82
AM2 - 60% CV (3.1)		Comp.	4700	28,82
AM2 - 60% CV (3.2)		Comp.	4600	28,20

Quadro A1.4 – Resistências à compressão e à flexão aos 61 dias.

Ref. Provete	Massa Provete (g)	Ensaio	Valor (kgf)	Resultado (MPa)
AMP (1)	593,1	Flexão	425	9,77
AMP (2)	599,9	Flexão	410	9,43
AMP (3)	592,8	Flexão	385	8,85
AMP (1.1)		Comp.		
AMP (1.2)		Comp.		
AMP (2.1)		Comp.	9000	55,18
AMP (2.2)		Comp.	8975	55,03
AMP (3.1)		Comp.	9400	57,63
AMP (3.2)		Comp.	9500	58,25
AM1 - 45% CV (1)	600,3	Flexão	365	8,39
AM1 - 45% CV (2)	609,5	Flexão	380	8,74
AM1 - 45% CV (3)	610,4	Flexão	375	8,62
AM1 - 45% CV (1.1)		Comp.	7200	44,15
AM1 - 45% CV (1.2)		Comp.	7550	46,29
AM1 - 45% CV (2.1)		Comp.	7500	45,98
AM1 - 45% CV (2.2)		Comp.	7200	44,15
AM1 - 45% CV (3.1)		Comp.	7500	45,98
AM1 - 45% CV (3.2)		Comp.	7600	46,60
AM0 - 50% CV (1)	604,7	Flexão	365	8,39
AM0 - 50% CV (2)	599,7	Flexão	345	7,93
AM0 - 50% CV (3)	602,5	Flexão	335	7,70
AM0 - 50% CV (1.1)		Comp.	6600	40,47
AM0 - 50% CV (1.2)		Comp.	6700	41,08
AM0 - 50% CV (2.1)		Comp.	6850	42,00
AM0 - 50% CV (2.2)		Comp.	7000	42,92
AM0 - 50% CV (3.1)		Comp.	6600	40,47
AM0 - 50% CV (3.2)		Comp.	6800	41,69
AM2 - 60% CV (1)	596,8	Flexão	300	6,90
AM2 - 60% CV (2)	598,3	Flexão	315	7,24
AM2 - 60% CV (3)	602,7	Flexão	290	6,67
AM2 - 60% CV (1.1)		Comp.	5800	35,56
AM2 - 60% CV (1.2)		Comp.	5500	33,72
AM2 - 60% CV (2.1)		Comp.	6000	36,79
AM2 - 60% CV (2.2)		Comp.	5950	36,48
AM2 - 60% CV (3.1)		Comp.	5350	32,80
AM2 - 60% CV (3.2)		Comp.	5800	35,56

Quadro A1.5 – Resistências à compressão e à flexão aos 91 dias.

Ref. Provete	Massa Provete (g)	Ensaio	Valor (kgf)	Resultado (MPa)
AMP (1)	599,1	Flexão	425	9,77
AMP (2)	585,3	Flexão	405	9,31
AMP (3)	602,4	Flexão	425	9,77
AMP (1.1)		Comp.	9300	57,02
AMP (1.2)		Comp.	9100	55,79
AMP (2.1)		Comp.	9150	56,10
AMP (2.2)		Comp.	9200	56,41
AMP (3.1)		Comp.	9650	59,17
AMP (3.2)		Comp.	10200	62,54
AM1 - 45% CV (1)	602,3	Flexão	385	8,85
AM1 - 45% CV (2)	603,0	Flexão	395	9,08
AM1 - 45% CV (3)	601,5	Flexão	430	9,89
AM1 - 45% CV (1.1)		Comp.	8100	49,66
AM1 - 45% CV (1.2)		Comp.	7800	47,82
AM1 - 45% CV (2.1)		Comp.	8200	50,28
AM1 - 45% CV (2.2)		Comp.	7900	48,44
AM1 - 45% CV (3.1)		Comp.	8350	51,20
AM1 - 45% CV (3.2)		Comp.	8000	49,05
AM0 - 50% CV (1)	599,4	Flexão	365	8,39
AM0 - 50% CV (2)	605,2	Flexão	360	8,28
AM0 - 50% CV (3)	596,1	Flexão	365	8,39
AM0 - 50% CV (1.1)		Comp.	7650	46,90
AM0 - 50% CV (1.2)		Comp.	7500	45,98
AM0 - 50% CV (2.1)		Comp.	7000	42,92
AM0 - 50% CV (2.2)		Comp.	7300	44,76
AM0 - 50% CV (3.1)		Comp.	7800	47,82
AM0 - 50% CV (3.2)		Comp.	7650	46,90
AM2 - 60% CV (1)	600,3	Flexão	330	7,59
AM2 - 60% CV (2)	604,3	Flexão	330	7,59
AM2 - 60% CV (3)	604,1	Flexão	325	7,47
AM2 - 60% CV (1.1)		Comp.	6900	42,31
AM2 - 60% CV (1.2)		Comp.	6850	42,00
AM2 - 60% CV (2.1)		Comp.	6650	40,77
AM2 - 60% CV (2.2)		Comp.	6700	41,08
AM2 - 60% CV (3.1)		Comp.	6300	38,63
AM2 - 60% CV (3.2)		Comp.	6350	38,93

Quadro A1.6 – Resistências à compressão e à flexão aos 210 dias.

Ref. Provete	Massa Provete (g)	Ensaio	Valor (kgf)	Resultado (MPa)
AMP (1)	599,0	Flexão	420	9,66
AMP (2)	602,3	Flexão	450	10,35
AMP (3)	607,5	Flexão	425	9,77
AMP (1.1)		Comp.	5100	31,27
AMP (1.2)		Comp.	9700	59,47
AMP (2.1)		Comp.	10200	62,54
AMP (2.2)		Comp.	10000	61,31
AMP (3.1)		Comp.	9350	57,33
AMP (3.2)		Comp.	9200	56,41
AM1 - 45% CV (1)	597,9	Flexão	445	10,23
AM1 - 45% CV (2)	609,5	Flexão	475	10,92
AM1 - 45% CV (3)	602,6	Flexão	480	11,04
AM1 - 45% CV (1.1)		Comp.	9300	57,02
AM1 - 45% CV (1.2)		Comp.	9450	57,94
AM1 - 45% CV (2.1)		Comp.	10000	61,31
AM1 - 45% CV (2.2)		Comp.	10000	61,31
AM1 - 45% CV (3.1)		Comp.	9700	59,47
AM1 - 45% CV (3.2)		Comp.	9250	56,71
AM0 - 50% CV (1)	598,7	Flexão	430	9,89
AM0 - 50% CV (2)	600,6	Flexão	460	10,58
AM0 - 50% CV (3)	592,4	Flexão	415	9,54
AM0 - 50% CV (1.1)		Comp.	10200	62,54
AM0 - 50% CV (1.2)		Comp.	10400	63,77
AM0 - 50% CV (2.1)		Comp.	9900	60,70
AM0 - 50% CV (2.2)		Comp.	9900	60,70
AM0 - 50% CV (3.1)		Comp.	10100	61,93
AM0 - 50% CV (3.2)		Comp.	10500	64,38
AM2 - 60% CV (1)	603,8	Flexão	375	8,62
AM2 - 60% CV (2)	600,5	Flexão	400	9,20
AM2 - 60% CV (3)	606	Flexão	375	8,62
AM2 - 60% CV (1.1)		Comp.	8000	49,05
AM2 - 60% CV (1.2)		Comp.	7900	48,44
AM2 - 60% CV (2.1)		Comp.	7800	47,82
AM2 - 60% CV (2.2)		Comp.	8300	50,89
AM2 - 60% CV (3.1)		Comp.	8800	53,96
AM2 - 60% CV (3.2)		Comp.	8600	52,73

A2

ANEXO 2 – RESISTÊNCIA AO DESGASTE POR ABRASÃO

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes no ensaio de resistência ao desgaste por abrasão. As espessuras iniciais e finais de cada provete são medidas em quatro pontos distintos (A, B, C e D). Os valores que apresentam um desvio superior a 10% relativamente à média não foram considerados e encontram-se marcados a vermelho.

Quadro A2.1 – Desgaste por abrasão de cada um dos provetes.

Identificação do provete	Provete nº.	Leitura	Ponto A	Ponto B	Ponto C	Ponto D	Desgaste (mm)
			espessura (mm)				
AMP	8	inicial	26,5	26,5	26,3	26,3	0,8
		final	25,6	25,6	25,7	25,6	
	9	inicial	26,5	26,3	26,3	26,6	2,1
		final	24,3	24,0	24,3	24,6	
	10	inicial	26,3	26,4	26,5	26,6	0,4
		final	26,0	26,0	26,2	26,2	
	11	inicial	26,3	26,6	26,4	26,2	0,7
		final	25,8	25,9	25,4	25,6	
AM1 (45% CV) a)	1	inicial	26,2	26,4	26,3	26,3	0,7
		final	25,5	25,4	25,5	25,8	
	2	inicial	27,0	26,8	26,3	26,6	0,2
		final	26,7	26,3	26,3	26,6	
	3	inicial	27,0	27,1	27,5	27,2	0,7
		final	26,3	26,4	26,7	26,4	
AM0 (50% CV)	12	inicial	26,3	26,4	26,2	26,0	0,7
		final	25,3	25,5	25,7	25,5	
	13	inicial	26,4	26,4	26,4	26,3	0,9
		final	25,7	25,6	25,1	25,4	
	14	inicial	26,4	26,3	26,4	26,4	1,1
		final	25,2	25,2	25,4	25,3	
	15	inicial	26,5	26,2	26,5	26,0	1,8
		final	24,4	24,2	24,5	24,8	
AM2 (60% CV)	4	inicial	26,3	26,1	26,1	26,4	0,8
		final	25,5	25,4	25,4	25,6	
	5	inicial	26,0	25,8	25,8	26,3	0,8
		final	25,0	24,9	25,2	25,4	
	6	inicial	26,6	26,6	26,9	27,0	1,1
		final	25,6	25,5	25,9	25,8	
	7	inicial	26,2	26,4	26,4	26,0	1,1
		final	25,4	25,3	24,9	25,0	

a) Na amostra “AM1 (45% CV)” só se ensaiaram três provetes por inutilização do quarto provete.

A3

ANEXO 3 – POROSIDADE LIVRE

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes no ensaio de porosidade livre. Determinou-se o peso inicial (W_0) e final (W_{48}) e ainda as dimensões de cada um dos provetes (L_1 , L_2 e h). Os valores que apresentam um desvio superior a 10% relativamente à média não foram considerados e encontram-se marcados a vermelho.

Quadro A3.1 – Porosidade livre dos diversos provetes da argamassa padrão.

Proвете	W_0 (g)	W_{48} (g)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	h (mm)	V (cm ³)	N_{48} (%)
AMP 1	158,03	168,04	41,16	40,36	45,08	74,89	13,37
AMP 2	153,22	163,04	40,00	41,04	44,08	72,36	13,57
AMP 3	151,02	160,76	40,10	41,04	43,40	71,42	13,64
AMP 4	158,01	168,14	40,10	40,22	45,51	73,40	13,80
AMP 5	148,50	158,32	40,26	41,12	42,52	70,39	13,95
AMP 6	156,04	166,20	40,28	41,04	45,08	74,52	13,63
AMP 7	100,34	106,62	41,04	40,40	28,28	46,89	13,39
AMP 8	111,95	119,01	40,30	41,14	31,58	52,36	13,48
AMP 9	125,44	133,24	40,45	41,00	35,25	58,46	13,34
AMP 10	117,74	125,03	40,55	41,20	33,28	55,60	13,11
AMP 11	119,06	126,65	40,15	41,21	33,57	55,54	13,66
AMP 12	107,22	113,85	41,07	39,77	30,25	49,41	13,42

Quadro A3.2 – Porosidade livre dos diversos provetes da argamassa com 45% de cinzas.

Proвете	W_0 (g)	W_{48} (g)	L_1 (mm)	L_2 (mm)	h (mm)	V (cm ³)	N_{48} (%)
AM1 1	152,87	158,50	40,83	39,56	43,60	70,42	7,99
AM1 2	159,65	166,04	39,81	41,34	44,82	73,76	8,66
AM1 3	155,24	160,87	39,42	40,52	44,48	71,05	7,92
AM1 4	156,06	162,43	39,78	40,72	43,95	71,19	8,95
AM1 5	160,25	166,57	40,98	40,90	44,06	73,85	8,56
AM1 6	158,37	164,56	40,70	41,05	43,67	72,96	8,48
AM1 7	125,77	129,09	41,19	40,42	33,94	56,51	5,88
AM1 8	118,27	123,25	40,63	39,86	33,52	54,29	9,17
AM1 9	113,32	118,05	39,98	41,45	31,25	51,79	9,13
AM1 10	113,54	117,91	40,56	40,86	30,91	51,23	8,53
AM1 11	107,69	110,89	39,66	39,32	30,80	48,03	6,66
AM1 12	115,39	119,45	39,12	40,63	33,03	52,50	7,73

Quadro A3.3 – Porosidade livre dos diversos provetes da argamassa com 50% de cinzas.

Proвете	W ₀ (g)	W ₄₈ (g)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	h (mm)	V (cm ³)	N ₄₈ (%)
AM0 1	155,75	161,73	40,10	40,06	45,02	72,32	8,27
AM0 2	158,75	164,74	39,91	40,48	44,92	72,57	8,25
AM0 3	158,70	165,00	40,15	40,52	44,72	72,75	8,66
AM0 4	161,49	167,71	40,14	40,52	45,48	73,97	8,41
AM0 5	160,48	164,94	40,06	40,76	45,12	73,67	6,05
AM0 6	158,70	164,19	40,51	40,34	44,37	72,51	7,57
AM0 7	119,45	124,08	40,64	40,25	33,36	54,57	8,48
AM0 8	101,96	106,02	40,17	40,73	28,92	47,32	8,58
AM0 9	103,13	106,88	40,14	39,29	29,10	45,89	8,17
AM0 10	100,41	105,18	40,20	40,32	28,32	45,90	10,39
AM0 11	117,37	121,78	39,94	39,57	33,81	53,43	8,25
AM0 12	120,02	124,42	40,23	40,26	33,62	54,45	8,08

Quadro A3.4 – Porosidade livre dos diversos provetes da argamassa com 60% de cinzas.

Proвете	W ₀ (g)	W ₄₈ (g)	L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	h (mm)	V (cm ³)	N ₄₈ (%)
AM2 1	156,12	162,93	40,66	41,01	43,35	72,28	9,42
AM2 2	158,38	165,03	40,44	40,86	43,56	71,98	9,24
AM2 3	160,06	167,03	40,45	40,92	44,28	73,29	9,51
AM2 4	158,39	164,99	40,37	40,59	43,96	72,03	9,16
AM2 5	160,14	166,33	40,60	39,79	45,78	73,96	8,37
AM2 6	154,40	160,41	40,98	40,21	43,27	71,30	8,43
AM2 7	111,69	115,84	40,79	41,01	30,63	51,24	8,10
AM2 8	122,47	127,91	40,39	40,79	33,82	55,72	9,76
AM2 9	113,34	118,50	40,15	40,34	32,02	51,86	9,95
AM2 10	117,81	123,04	40,98	39,97	33,28	54,51	9,59
AM2 11	105,74	110,50	39,82	40,81	30,71	49,91	9,54
AM2 12	114,98	120,34	40,45	40,08	31,72	51,43	10,42

A4

ANEXO 4 – ABSORÇÃO DE ÁGUA
POR CAPILARIDADE

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Quadro A4.1 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 1.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	16	27	12	2007	157,39	0	0,0000	16,61	0,0000
9	39	27	12	2007	158,96	23	0,6191		0,0945
9	59	27	12	2007	159,62	43	0,8466		0,1343
10	20	27	12	2007	160,15	64	1,0328		0,1662
10	35	27	12	2007	160,59	79	1,1475		0,1927
10	49	27	12	2007	160,98	93	1,2450		0,2161
11	11	27	12	2007	161,5	115	1,3844		0,2474
11	59	27	12	2007	162,47	163	1,6482		0,3058
13	40	27	12	2007	163,89	264	2,0976		0,3913
16	29	27	12	2007	165,46	433	2,6864		0,4859
19	55	27	12	2007	166,84	639	3,2634		0,5689
0	37	28	12	2007	167,45	921	3,9179		0,6057
10	29	28	12	2007	167,58	1513	5,0216		0,6135
15	57	28	12	2007	167,62	1841	5,5393		0,6159
20	18	28	12	2007	167,67	2102	5,9189		0,6189
13	55	29	12	2007	167,76	3159	7,2560		0,6243
20	17	29	12	2007	167,79	3541	7,6822		0,6261
12	54	31	12	2007	167,9	5978	9,9816		0,6328
15	11	2	1	2008	168	8995	12,2440		0,6388
12	46	3	1	2008	168,02	10290	13,0958		0,6400
12	30	4	1	2008	168,06	11714	13,9726		0,6424
13	15	10	1	2008	168,18	20399	18,4386		0,6496
12	29	14	1	2008	168,22	26113	20,8618		0,6520

Quadro A4.2 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 2.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	19	27	12	2007	152,75	0	0,0000	16,42	0,0000
9	40	27	12	2007	154,47	21	0,5916		0,1048
10	0	27	12	2007	155,19	41	0,8266		0,1486
10	20	27	12	2007	155,81	61	1,0083		0,1864
10	36	27	12	2007	156,25	77	1,1328		0,2132
10	49	27	12	2007	156,61	90	1,2247		0,2351
11	11	27	12	2007	157,08	112	1,3663		0,2637
12	0	27	12	2007	157,98	161	1,6381		0,3185
13	41	27	12	2007	159,31	262	2,0897		0,3995
16	30	27	12	2007	160,85	431	2,6802		0,4933
19	55	27	12	2007	162,11	636	3,2558		0,5700
0	38	28	12	2007	162,57	919	3,9137		0,5981
10	30	28	12	2007	162,69	1511	5,0183		0,6054
15	57	28	12	2007	162,73	1838	5,5347		0,6078
20	19	28	12	2007	162,74	2100	5,9161		0,6084
13	55	29	12	2007	162,85	3156	7,2526		0,6151
20	18	29	12	2007	162,87	3539	7,6801		0,6163
12	54	31	12	2007	163	5975	9,9791		0,6242
15	12	2	1	2008	163,1	8993	12,2427		0,6303
12	46	3	1	2008	163,13	10287	13,0939		0,6322
12	31	4	1	2008	163,16	11712	13,9714		0,6340
13	16	10	1	2008	163,25	20397	18,4377		0,6395
12	30	14	1	2008	163,29	26111	20,8610		0,6419

Quadro A4.3 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 3.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	19	27	12	2007	150,62	0	0,0000	16,46	0
9	40	27	12	2007	152,63	21	0,5916		0,1221
10	1	27	12	2007	153,49	42	0,8367		0,1744
10	20	27	12	2007	154,2	61	1,0083		0,2175
10	36	27	12	2007	154,71	77	1,1328		0,2485
10	50	27	12	2007	155,12	91	1,2315		0,2734
11	12	27	12	2007	155,64	113	1,3723		0,3050
12	1	27	12	2007	156,55	162	1,6432		0,3603
13	42	27	12	2007	157,85	263	2,0936		0,4392
16	31	27	12	2007	159,27	432	2,6833		0,5255
19	56	27	12	2007	160,17	637	3,2583		0,5802
0	39	28	12	2007	160,35	920	3,9158		0,5911
10	30	28	12	2007	160,47	1511	5,0183		0,5984
15	58	28	12	2007	160,5	1839	5,5362		0,6002
20	19	28	12	2007	160,53	2100	5,9161		0,6021
13	56	29	12	2007	160,61	3157	7,2537		0,6069
20	19	29	12	2007	160,62	3540	7,6811		0,6075
12	55	31	12	2007	160,82	5976	9,9800		0,6197
15	12	2	1	2008	160,84	8993	12,2427		0,6209
12	47	3	1	2008	160,86	10288	13,0945		0,6221
12	31	4	1	2008	160,88	11712	13,9714		0,6233
13	17	10	1	2008	160,98	20398	18,4382		0,6294
12	31	14	1	2008	161,01	26112	20,8614		0,6312

Quadro A4.4 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 4.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	20	27	12	2007	157,57	0	0,0000	16,13	0,0000
9	41	27	12	2007	159,53	21	0,5916		0,1215
10	1	27	12	2007	160,35	41	0,8266		0,1723
10	21	27	12	2007	161,01	61	1,0083		0,2133
10	36	27	12	2007	161,48	76	1,1255		0,2424
10	50	27	12	2007	161,85	90	1,2247		0,2653
11	13	27	12	2007	162,41	113	1,3723		0,3001
12	1	27	12	2007	163,35	161	1,6381		0,3583
13	42	27	12	2007	164,71	262	2,0897		0,4427
16	32	27	12	2007	166,26	432	2,6833		0,5387
19	57	27	12	2007	167,41	637	3,2583		0,6100
0	39	28	12	2007	167,71	919	3,9137		0,6286
10	31	28	12	2007	167,83	1511	5,0183		0,6361
15	59	28	12	2007	167,86	1839	5,5362		0,6379
20	20	28	12	2007	167,88	2100	5,9161		0,6392
13	56	29	12	2007	167,99	3156	7,2526		0,6460
20	19	29	12	2007	168	3539	7,6801		0,6466
12	55	31	12	2007	168,16	5975	9,9791		0,6565
15	13	2	1	2008	168,23	8993	12,2427		0,6609
12	47	3	1	2008	168,27	10287	13,0939		0,6634
12	32	4	1	2008	168,3	11712	13,9714		0,6652
13	17	10	1	2008	168,38	20397	18,4377		0,6702
12	32	14	1	2008	168,42	26112	20,8614		0,6727

Quadro A4.5 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 5.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	20	27	12	2007	148,08	0	0,0000	16,55	0,0000
9	41	27	12	2007	150,14	21	0,5916		0,1245
10	2	27	12	2007	150,95	42	0,8367		0,1734
10	21	27	12	2007	151,6	61	1,0083		0,2127
10	36	27	12	2007	152,09	76	1,1255		0,2423
10	50	27	12	2007	152,45	90	1,2247		0,2640
11	13	27	12	2007	153,01	113	1,3723		0,2979
12	2	27	12	2007	153,9	162	1,6432		0,3517
13	43	27	12	2007	155,28	263	2,0936		0,4350
16	32	27	12	2007	156,88	432	2,6833		0,5317
19	58	27	12	2007	157,73	638	3,2609		0,5831
0	40	28	12	2007	157,88	920	3,9158		0,5921
10	31	28	12	2007	157,98	1511	5,0183		0,5982
15	59	28	12	2007	158,01	1839	5,5362		0,6000
20	20	28	12	2007	158,04	2100	5,9161		0,6018
13	57	29	12	2007	158,11	3157	7,2537		0,6060
20	19	29	12	2007	158,15	3539	7,6801		0,6085
12	56	31	12	2007	158,31	5976	9,9800		0,6181
15	14	2	1	2008	158,42	8994	12,2434		0,6248
12	48	3	1	2008	158,37	10288	13,0945		0,6218
12	32	4	1	2008	158,44	11712	13,9714		0,6260
13	18	10	1	2008	158,51	20398	18,4382		0,6302
12	33	14	1	2008	158,55	26113	20,8618		0,6326

Quadro A4.6 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 6.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	20	27	12	2007	155,55	0	0,0000	16,53	0,0000
9	42	27	12	2007	157,49	22	0,6055		0,1174
10	2	27	12	2007	158,3	42	0,8367		0,1664
10	21	27	12	2007	158,94	61	1,0083		0,2051
10	37	27	12	2007	159,41	77	1,1328		0,2335
10	51	27	12	2007	159,82	91	1,2315		0,2583
11	14	27	12	2007	160,4	114	1,3784		0,2934
12	3	27	12	2007	161,26	163	1,6482		0,3454
13	44	27	12	2007	162,55	264	2,0976		0,4235
16	33	27	12	2007	164,08	433	2,6864		0,5160
19	58	27	12	2007	165,37	638	3,2609		0,5941
0	40	28	12	2007	165,74	920	3,9158		0,6165
10	32	28	12	2007	165,87	1512	5,0200		0,6243
16	0	28	12	2007	165,9	1840	5,5377		0,6261
20	21	28	12	2007	165,94	2101	5,9175		0,6286
13	57	29	12	2007	166,04	3157	7,2537		0,6346
20	20	29	12	2007	166,06	3540	7,6811		0,6358
12	56	31	12	2007	166,19	5976	9,9800		0,6437
15	14	2	1	2008	166,34	8994	12,2434		0,6528
12	48	3	1	2008	166,32	10288	13,0945		0,6515
12	33	4	1	2008	166,34	11713	13,9720		0,6528
13	18	10	1	2008	166,47	20398	18,4382		0,6606
12	33	14	1	2008	166,51	26113	20,8618		0,6630

Quadro A4.7 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 7.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	21	27	12	2007	99,99	0	0,0000	16,58	0,0000
9	42	27	12	2007	101,07	21	0,5916		0,0651
10	2	27	12	2007	101,65	41	0,8266		0,1001
10	22	27	12	2007	102,22	61	1,0083		0,1345
10	37	27	12	2007	102,66	76	1,1255		0,1610
10	51	27	12	2007	103,05	90	1,2247		0,1846
11	15	27	12	2007	103,6	114	1,3784		0,2177
12	3	27	12	2007	104,41	162	1,6432		0,2666
13	44	27	12	2007	105,55	263	2,0936		0,3353
16	33	27	12	2007	106,23	432	2,6833		0,3764
19	59	27	12	2007	106,3	638	3,2609		0,3806
0	41	28	12	2007	106,37	920	3,9158		0,3848
10	32	28	12	2007	106,44	1511	5,0183		0,3890
16	2	28	12	2007	106,45	1841	5,5393		0,3896
20	21	28	12	2007	106,47	2100	5,9161		0,3908
13	58	29	12	2007	106,53	3157	7,2537		0,3944
20	21	29	12	2007	106,56	3540	7,6811		0,3963
12	57	31	12	2007	106,65	5976	9,9800		0,4017
15	15	2	1	2008	106,67	8994	12,2434		0,4029
12	49	3	1	2008	106,71	10288	13,0945		0,4053
12	33	4	1	2008	106,74	11712	13,9714		0,4071
13	19	10	1	2008	106,81	20398	18,4382		0,4113
12	34	14	1	2008	106,79	26113	20,8618		0,4101

Quadro A4.8 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 8.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	21	27	12	2007	111,53	0	0,0000	16,58	0,0000
9	43	27	12	2007	112,79	22	0,6055		0,0760
10	3	27	12	2007	113,47	42	0,8367		0,1170
10	22	27	12	2007	114,09	61	1,0083		0,1544
10	37	27	12	2007	114,58	76	1,1255		0,1840
10	51	27	12	2007	115,01	90	1,2247		0,2099
11	16	27	12	2007	115,66	115	1,3844		0,2491
12	4	27	12	2007	116,66	163	1,6482		0,3094
13	45	27	12	2007	118,03	264	2,0976		0,3921
16	34	27	12	2007	118,59	433	2,6864		0,4258
20	0	27	12	2007	118,64	639	3,2634		0,4288
0	41	28	12	2007	118,72	920	3,9158		0,4337
10	33	28	12	2007	118,81	1512	5,0200		0,4391
16	3	28	12	2007	118,84	1842	5,5408		0,4409
20	22	28	12	2007	118,85	2101	5,9175		0,4415
13	58	29	12	2007	118,92	3157	7,2537		0,4457
20	21	29	12	2007	118,93	3540	7,6811		0,4463
12	58	31	12	2007	119,02	5977	9,9808		0,4518
15	15	2	1	2008	119,1	8994	12,2434		0,4566
12	50	3	1	2008	119,08	10289	13,0952		0,4554
12	34	4	1	2008	119,12	11713	13,9720		0,4578
13	19	10	1	2008	119,18	20398	18,4382		0,4614
12	35	14	1	2008	119,17	26114	20,8622		0,4608

Quadro A4.9 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 9.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	22	27	12	2007	124,96	0	0,0000	16,58	0,0000
9	43	27	12	2007	126,4	21	0,5916		0,0868
10	3	27	12	2007	127,08	41	0,8266		0,1278
10	22	27	12	2007	127,69	60	1,0000		0,1646
10	38	27	12	2007	128,18	76	1,1255		0,1942
10	52	27	12	2007	128,6	90	1,2247		0,2195
11	17	27	12	2007	129,21	115	1,3844		0,2563
12	5	27	12	2007	130,19	163	1,6482		0,3154
13	45	27	12	2007	131,62	263	2,0936		0,4016
16	35	27	12	2007	132,71	433	2,6864		0,4673
20	1	27	12	2007	132,8	639	3,2634		0,4727
0	42	28	12	2007	132,91	920	3,9158		0,4794
10	33	28	12	2007	133	1511	5,0183		0,4848
16	3	28	12	2007	133,03	1841	5,5393		0,4866
20	22	28	12	2007	133,05	2100	5,9161		0,4878
13	59	29	12	2007	133,13	3157	7,2537		0,4926
20	22	29	12	2007	133,14	3540	7,6811		0,4932
12	58	31	12	2007	133,24	5976	9,9800		0,4993
15	15	2	1	2008	133,31	8993	12,2427		0,5035
12	50	3	1	2008	133,32	10288	13,0945		0,5041
12	34	4	1	2008	133,34	11712	13,9714		0,5053
13	20	10	1	2008	133,43	20398	18,4382		0,5107
12	36	14	1	2008	133,41	26114	20,8622		0,5095

Quadro A4.10 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 10.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	22	27	12	2007	117,3	0	0,0000	16,71	0,0000
9	44	27	12	2007	118,59	22	0,6055		0,0772
10	4	27	12	2007	119,2	42	0,8367		0,1137
10	23	27	12	2007	119,71	61	1,0083		0,1443
10	38	27	12	2007	120,09	76	1,1255		0,1670
10	52	27	12	2007	120,44	90	1,2247		0,1879
11	17	27	12	2007	120,95	115	1,3844		0,2185
12	5	27	12	2007	121,82	163	1,6482		0,2706
13	46	27	12	2007	123,21	264	2,0976		0,3538
16	35	27	12	2007	124,49	433	2,6864		0,4304
20	1	27	12	2007	124,68	639	3,2634		0,4417
0	43	28	12	2007	124,75	921	3,9179		0,4459
10	34	28	12	2007	124,85	1512	5,0200		0,4519
16	4	28	12	2007	124,87	1842	5,5408		0,4531
20	23	28	12	2007	124,9	2101	5,9175		0,4549
14	0	29	12	2007	124,96	3158	7,2549		0,4585
20	22	29	12	2007	124,98	3540	7,6811		0,4597
12	59	31	12	2007	125,09	5977	9,9808		0,4663
15	16	2	1	2008	125,15	8994	12,2434		0,4699
12	50	3	1	2008	125,15	10288	13,0945		0,4699
12	34	4	1	2008	125,19	11712	13,9714		0,4723
13	20	10	1	2008	125,24	20398	18,4382		0,4753
12	36	14	1	2008	125,26	26114	20,8622		0,4765

Quadro A4.11 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 11.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	22	27	12	2007	118,63	0	0,0000	16,55	0,0000
9	45	27	12	2007	119,88	23	0,6191		0,0755
10	4	27	12	2007	120,49	42	0,8367		0,1124
10	23	27	12	2007	121,05	61	1,0083		0,1463
10	38	27	12	2007	121,49	76	1,1255		0,1729
10	52	27	12	2007	121,87	90	1,2247		0,1958
11	18	27	12	2007	122,5	116	1,3904		0,2339
12	7	27	12	2007	123,48	165	1,6583		0,2931
13	47	27	12	2007	124,97	265	2,1016		0,3832
16	36	27	12	2007	126,12	434	2,6895		0,4527
20	2	27	12	2007	126,23	640	3,2660		0,4593
0	44	28	12	2007	126,32	922	3,9200		0,4648
10	34	28	12	2007	126,4	1512	5,0200		0,4696
16	4	28	12	2007	126,42	1842	5,5408		0,4708
20	23	28	12	2007	126,46	2101	5,9175		0,4732
14	0	29	12	2007	126,54	3158	7,2549		0,4781
20	25	29	12	2007	126,54	3543	7,6844		0,4781
12	59	31	12	2007	126,65	5977	9,9808		0,4847
15	16	2	1	2008	126,69	8994	12,2434		0,4871
12	51	3	1	2008	126,72	10289	13,0952		0,4889
12	35	4	1	2008	126,76	11713	13,9720		0,4914
13	21	10	1	2008	126,8	20399	18,4386		0,4938
12	37	14	1	2008	126,84	26115	20,8626		0,4962

Quadro A4.12 – Absorção de água por capilaridade, provete AMP 12.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
	23	27	12	2007	106,84	0	0,0000	16,33	0,0000
9	45	27	12	2007	108,18	22	0,6055		0,0820
10	4	27	12	2007	108,78	41	0,8266		0,1188
10	23	27	12	2007	109,32	60	1,0000		0,1518
10	38	27	12	2007	109,7	75	1,1180		0,1751
10	52	27	12	2007	110,06	89	1,2179		0,1971
11	18	27	12	2007	110,64	115	1,3844		0,2327
12	7	27	12	2007	111,55	164	1,6533		0,2884
13	47	27	12	2007	112,8	264	2,0976		0,3649
16	36	27	12	2007	113,41	433	2,6864		0,4022
20	3	27	12	2007	113,47	640	3,2660		0,4059
0	44	28	12	2007	113,53	921	3,9179		0,4096
10	35	28	12	2007	113,62	1512	5,0200		0,4151
16	5	28	12	2007	113,63	1842	5,5408		0,4157
20	24	28	12	2007	113,67	2101	5,9175		0,4182
14	0	29	12	2007	113,75	3157	7,2537		0,4231
20	26	29	12	2007	113,74	3543	7,6844		0,4224
12	59	31	12	2007	113,85	5976	9,9800		0,4292
15	17	2	1	2008	113,88	8994	12,2434		0,4310
12	52	3	1	2008	113,9	10289	13,0952		0,4322
12	35	4	1	2008	113,94	11712	13,9714		0,4347
13	21	10	1	2008	114	20398	18,4382		0,4384
12	38	14	1	2008	114	26115	20,8626		0,4384

Quadro A4.13 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 1 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
	28	27	12	2007	150,41	0	0,0000	16,15	0,0000
9	50	27	12	2007	151,97	22	0,6055		0,0966
10	9	27	12	2007	152,55	41	0,8266		0,1325
10	27	27	12	2007	152,99	59	0,9916		0,1597
10	42	27	12	2007	153,33	74	1,1106		0,1808
10	56	27	12	2007	153,64	88	1,2111		0,2000
11	27	27	12	2007	154,2	119	1,4083		0,2346
12	17	27	12	2007	155,02	169	1,6783		0,2854
13	56	27	12	2007	156,24	268	2,1134		0,3609
16	45	27	12	2007	157,58	437	2,6988		0,4439
20	11	27	12	2007	158,4	643	3,2736		0,4947
0	52	28	12	2007	158,96	924	3,9243		0,5293
10	43	28	12	2007	159,17	1515	5,0249		0,5423
16	12	28	12	2007	159,23	1844	5,5438		0,5461
20	31	28	12	2007	159,23	2103	5,9203		0,5461
14	7	29	12	2007	159,29	3159	7,2560		0,5498
20	32	29	12	2007	159,33	3544	7,6855		0,5522
13	7	31	12	2007	159,41	5979	9,9825		0,5572
15	23	2	1	2008	159,5	8995	12,2440		0,5628
12	59	3	1	2008	159,52	10291	13,0964		0,5640
12	41	4	1	2008	159,53	11713	13,9720		0,5646
13	27	10	1	2008	159,63	20399	18,4386		0,5708
12	45	14	1	2008	159,67	26117	20,8634		0,5733

Quadro A4.14 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 2 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
	29	27	12	2007	156,9	0	0,0000		0,0000
9	51	27	12	2007	158,8	22	0,6055		0,1154
10	9	27	12	2007	159,44	40	0,8165		0,1543
10	28	27	12	2007	159,98	59	0,9916		0,1871
10	42	27	12	2007	160,39	73	1,1030		0,2121
10	57	27	12	2007	160,75	88	1,2111		0,2339
11	27	27	12	2007	161,42	118	1,4024		0,2746
12	17	27	12	2007	162,3	168	1,6733		0,3281
13	57	27	12	2007	163,58	268	2,1134		0,4059
16	46	27	12	2007	164,88	437	2,6988		0,4849
20	12	27	12	2007	165,65	643	3,2736		0,5317
0	53	28	12	2007	166,04	924	3,9243	16,46	0,5554
10	43	28	12	2007	166,11	1514	5,0233		0,5596
16	13	28	12	2007	166,15	1844	5,5438		0,5621
20	31	28	12	2007	166,16	2102	5,9189		0,5627
14	8	29	12	2007	166,23	3159	7,2560		0,5669
20	32	29	12	2007	166,29	3543	7,6844		0,5706
13	7	31	12	2007	166,35	5978	9,9816		0,5742
15	24	2	1	2008	166,44	8995	12,2440		0,5797
12	59	3	1	2008	166,47	10290	13,0958		0,5815
12	42	4	1	2008	166,49	11713	13,9720		0,5827
13	28	10	1	2008	166,58	20399	18,4386		0,5882
12	45	14	1	2008	166,64	26116	20,8630		0,5918

Quadro A4.15 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 3 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
	29	27	12	2007	152,66	0	0,0000		0,0000
9	51	27	12	2007	154,09	22	0,6055		0,0895
10	10	27	12	2007	154,6	41	0,8266		0,1215
10	28	27	12	2007	155,03	59	0,9916		0,1484
10	43	27	12	2007	155,36	74	1,1106		0,1690
10	57	27	12	2007	155,64	88	1,2111		0,1866
11	28	27	12	2007	156,2	119	1,4083		0,2216
12	18	27	12	2007	157,02	169	1,6783		0,2730
13	57	27	12	2007	158,32	268	2,1134		0,3543
16	47	27	12	2007	159,78	438	2,7019		0,4458
20	12	27	12	2007	160,77	643	3,2736		0,5077
0	53	28	12	2007	161,43	924	3,9243	15,97	0,5491
10	44	28	12	2007	161,64	1515	5,0249		0,5622
16	13	28	12	2007	161,71	1844	5,5438		0,5666
20	32	28	12	2007	161,71	2103	5,9203		0,5666
14	8	29	12	2007	161,78	3159	7,2560		0,5710
20	33	29	12	2007	161,82	3544	7,6855		0,5735
13	8	31	12	2007	161,89	5979	9,9825		0,5779
15	24	2	1	2008	161,98	8995	12,2440		0,5835
13	0	3	1	2008	161,99	10291	13,0964		0,5841
12	42	4	1	2008	162,02	11713	13,9720		0,5860
13	28	10	1	2008	162,11	20399	18,4386		0,5916
12	46	14	1	2008	162,16	26117	20,8634		0,5948

Quadro A4.16 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 4 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	30	27	12	2007	153,64	0	0,0000	16,20	0,0000
9	51	27	12	2007	155,5	21	0,5916		0,1148
10	10	27	12	2007	156,17	40	0,8165		0,1562
10	28	27	12	2007	156,69	58	0,9832		0,1883
10	43	27	12	2007	157,06	73	1,1030		0,2111
10	57	27	12	2007	157,41	87	1,2042		0,2327
11	29	27	12	2007	158,02	119	1,4083		0,2704
12	19	27	12	2007	158,84	169	1,6783		0,3210
13	58	27	12	2007	160,09	268	2,1134		0,3982
16	47	27	12	2007	161,29	437	2,6988		0,4723
20	13	27	12	2007	161,99	643	3,2736		0,5155
0	54	28	12	2007	162,31	924	3,9243		0,5352
10	44	28	12	2007	162,4	1514	5,0233		0,5408
16	14	28	12	2007	162,44	1844	5,5438		0,5433
20	32	28	12	2007	162,43	2102	5,9189		0,5426
14	9	29	12	2007	162,5	3159	7,2560		0,5470
20	33	29	12	2007	162,54	3543	7,6844		0,5494
13	8	31	12	2007	162,6	5978	9,9816		0,5531
15	25	2	1	2008	162,7	8995	12,2440		0,5593
13	0	3	1	2008	162,72	10290	13,0958		0,5605
12	43	4	1	2008	162,74	11713	13,9720		0,5618
13	29	10	1	2008	162,82	20399	18,4386		0,5667
12	46	14	1	2008	162,88	26116	20,8630		0,5704

Quadro A4.17 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 5 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	30	27	12	2007	157,6	0	0,0000	16,76	0,0000
9	52	27	12	2007	159,33	22	0,6055		0,1032
10	11	27	12	2007	160	41	0,8266		0,1432
10	29	27	12	2007	160,56	59	0,9916		0,1766
10	43	27	12	2007	160,99	73	1,1030		0,2023
10	57	27	12	2007	161,35	87	1,2042		0,2237
11	29	27	12	2007	162,04	119	1,4083		0,2649
12	20	27	12	2007	162,93	170	1,6833		0,3180
13	59	27	12	2007	164,15	269	2,1174		0,3908
16	48	27	12	2007	165,32	438	2,7019		0,4606
20	13	27	12	2007	166,04	643	3,2736		0,5036
0	54	28	12	2007	166,58	924	3,9243		0,5358
10	45	28	12	2007	166,71	1515	5,0249		0,5435
16	15	28	12	2007	166,73	1845	5,5453		0,5447
20	33	28	12	2007	166,75	2103	5,9203		0,5459
14	9	29	12	2007	166,8	3159	7,2560		0,5489
20	34	29	12	2007	166,9	3544	7,6855		0,5549
13	9	31	12	2007	166,94	5979	9,9825		0,5573
15	25	2	1	2008	167,03	8995	12,2440		0,5626
13	1	3	1	2008	167,04	10291	13,0964		0,5632
12	43	4	1	2008	167,08	11713	13,9720		0,5656
13	29	10	1	2008	167,18	20399	18,4386		0,5716
12	47	14	1	2008	167,24	26117	20,8634		0,5752

Quadro A4.18 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 6 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	30	27	12	2007	155,84	0	0,0000	16,71	0,0000
9	52	27	12	2007	157,45	22	0,6055		0,0964
10	11	27	12	2007	158,06	41	0,8266		0,1329
10	29	27	12	2007	158,56	59	0,9916		0,1628
10	43	27	12	2007	158,96	73	1,1030		0,1867
10	58	27	12	2007	159,34	88	1,2111		0,2095
11	30	27	12	2007	160,04	120	1,4142		0,2514
12	21	27	12	2007	160,94	171	1,6882		0,3053
13	59	27	12	2007	162,24	269	2,1174		0,3831
16	49	27	12	2007	163,48	439	2,7049		0,4573
20	14	27	12	2007	164,21	644	3,2762		0,5010
0	55	28	12	2007	164,61	925	3,9264		0,5249
10	45	28	12	2007	164,72	1515	5,0249		0,5315
16	15	28	12	2007	164,77	1845	5,5453		0,5345
20	34	28	12	2007	164,76	2104	5,9217		0,5339
14	10	29	12	2007	164,83	3160	7,2572		0,5381
20	34	29	12	2007	164,87	3544	7,6855		0,5405
13	9	31	12	2007	164,94	5979	9,9825		0,5447
15	26	2	1	2008	165,03	8996	12,2447		0,5501
13	1	3	1	2008	165,08	10291	13,0964		0,5531
12	43	4	1	2008	165,09	11713	13,9720		0,5536
13	30	10	1	2008	165,17	20400	18,4391		0,5584
12	47	14	1	2008	165,23	26117	20,8634		0,5620

Quadro A4.19 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 7 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	31	27	12	2007	123,82	0	0,0000	16,65	0,0000
9	52	27	12	2007	124,61	21	0,5916		0,0475
10	11	27	12	2007	124,89	40	0,8165		0,0643
10	29	27	12	2007	125,16	58	0,9832		0,0805
10	44	27	12	2007	125,38	73	1,1030		0,0937
10	58	27	12	2007	125,59	87	1,2042		0,1063
11	31	27	12	2007	126,01	120	1,4142		0,1315
12	22	27	12	2007	126,62	171	1,6882		0,1682
14	0	27	12	2007	127,55	269	2,1174		0,2240
16	49	27	12	2007	128,68	438	2,7019		0,2919
20	15	27	12	2007	129,47	644	3,2762		0,3394
0	55	28	12	2007	130,12	924	3,9243		0,3784
10	46	28	12	2007	130,53	1515	5,0249		0,4030
16	16	28	12	2007	130,56	1845	5,5453		0,4048
20	34	28	12	2007	130,57	2103	5,9203		0,4054
14	10	29	12	2007	130,62	3159	7,2560		0,4084
20	35	29	12	2007	130,64	3544	7,6855		0,4096
13	10	31	12	2007	130,71	5979	9,9825		0,4138
15	26	2	1	2008	130,8	8995	12,2440		0,4192
13	1	3	1	2008	130,8	10290	13,0958		0,4192
12	44	4	1	2008	130,82	11713	13,9720		0,4204
13	30	10	1	2008	130,88	20399	18,4386		0,4240
12	48	14	1	2008	130,96	26117	20,8634		0,4289

Quadro A4.20 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 8 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	31	27	12	2007	116,47	0	0,0000	16,20	0,0000
9	53	27	12	2007	117,95	22	0,6055		0,0914
10	12	27	12	2007	118,52	41	0,8266		0,1266
10	30	27	12	2007	119,08	59	0,9916		0,1612
10	44	27	12	2007	119,43	73	1,1030		0,1828
10	58	27	12	2007	119,76	87	1,2042		0,2031
11	31	27	12	2007	120,38	120	1,4142		0,2414
12	22	27	12	2007	121,09	171	1,6882		0,2853
14	0	27	12	2007	122,01	269	2,1174		0,3421
16	50	27	12	2007	122,74	439	2,7049		0,3872
20	15	27	12	2007	123,09	644	3,2762		0,4088
0	56	28	12	2007	123,21	925	3,9264		0,4162
10	46	28	12	2007	123,26	1515	5,0249		0,4193
16	16	28	12	2007	123,31	1845	5,5453		0,4223
20	35	28	12	2007	123,3	2104	5,9217		0,4217
14	11	29	12	2007	123,35	3160	7,2572		0,4248
20	35	29	12	2007	123,37	3544	7,6855		0,4261
13	10	31	12	2007	123,43	5979	9,9825		0,4298
15	27	2	1	2008	123,5	8996	12,2447		0,4341
13	2	3	1	2008	123,5	10291	13,0964		0,4341
12	45	4	1	2008	123,53	11714	13,9726		0,4359
13	31	10	1	2008	123,6	20400	18,4391		0,4403
12	48	14	1	2008	123,68	26117	20,8634		0,4452

Quadro A4.21 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 9 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	31	27	12	2007	111,57	0	0,0000	16,57	0,0000
9	53	27	12	2007	112,77	22	0,6055		0,0724
10	12	27	12	2007	113,22	41	0,8266		0,0996
10	30	27	12	2007	113,64	59	0,9916		0,1249
10	44	27	12	2007	113,98	73	1,1030		0,1454
10	58	27	12	2007	114,26	87	1,2042		0,1623
11	32	27	12	2007	114,84	121	1,4201		0,1973
12	23	27	12	2007	115,54	172	1,6931		0,2396
14	1	27	12	2007	116,52	270	2,1213		0,2987
16	50	27	12	2007	117,44	439	2,7049		0,3542
20	16	27	12	2007	117,98	645	3,2787		0,3868
0	57	28	12	2007	118,25	926	3,9285		0,4031
10	47	28	12	2007	118,33	1516	5,0266		0,4079
16	17	28	12	2007	118,36	1846	5,5468		0,4097
20	35	28	12	2007	118,35	2104	5,9217		0,4091
14	11	29	12	2007	118,42	3160	7,2572		0,4134
20	35	29	12	2007	118,44	3544	7,6855		0,4146
13	11	31	12	2007	118,5	5980	9,9833		0,4182
15	27	2	1	2008	118,56	8996	12,2447		0,4218
13	2	3	1	2008	118,57	10291	13,0964		0,4224
12	45	4	1	2008	118,59	11714	13,9726		0,4236
13	31	10	1	2008	118,69	20400	18,4391		0,4296
12	49	14	1	2008	118,73	26118	20,8638		0,4321

Quadro A4.22 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 10 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	32	27	12	2007	111,78	0	0,0000	16,57	0,0000
9	53	27	12	2007	112,64	21	0,5916		0,0519
10	12	27	12	2007	113,03	40	0,8165		0,0754
10	30	27	12	2007	113,41	58	0,9832		0,0984
10	45	27	12	2007	113,71	73	1,1030		0,1165
10	59	27	12	2007	114	87	1,2042		0,1340
11	33	27	12	2007	114,57	121	1,4201		0,1683
12	24	27	12	2007	115,33	172	1,6931		0,2142
14	2	27	12	2007	116,4	270	2,1213		0,2788
16	51	27	12	2007	117,48	439	2,7049		0,3439
20	17	27	12	2007	118	645	3,2787		0,3753
0	57	28	12	2007	118,22	925	3,9264		0,3886
10	47	28	12	2007	118,28	1515	5,0249		0,3922
16	17	28	12	2007	118,31	1845	5,5453		0,3940
20	36	28	12	2007	118,33	2104	5,9217		0,3952
14	12	29	12	2007	118,36	3160	7,2572		0,3970
20	36	29	12	2007	118,42	3544	7,6855		0,4007
13	11	31	12	2007	118,45	5979	9,9825		0,4025
15	28	2	1	2008	118,54	8996	12,2447		0,4079
13	3	3	1	2008	118,55	10291	13,0964		0,4085
12	46	4	1	2008	118,56	11714	13,9726		0,4091
13	31	10	1	2008	118,64	20399	18,4386		0,4139
12	49	14	1	2008	118,68	26117	20,8634		0,4163

Quadro A4.23 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 11 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	32	27	12	2007	106,16	0	0,0000	15,59	0,0000
9	53	27	12	2007	106,87	21	0,5916		0,0455
10	13	27	12	2007	107,03	41	0,8266		0,0558
10	30	27	12	2007	107,2	58	0,9832		0,0667
10	45	27	12	2007	107,36	73	1,1030		0,0770
10	59	27	12	2007	107,5	87	1,2042		0,0859
11	33	27	12	2007	107,78	121	1,4201		0,1039
12	24	27	12	2007	108,19	172	1,6931		0,1302
14	2	27	12	2007	108,92	270	2,1213		0,1770
16	52	27	12	2007	109,91	440	2,7080		0,2405
20	17	27	12	2007	110,81	645	3,2787		0,2982
0	58	28	12	2007	111,6	926	3,9285		0,3488
10	47	28	12	2007	112,11	1515	5,0249		0,3815
16	18	28	12	2007	112,18	1846	5,5468		0,3860
20	36	28	12	2007	112,19	2104	5,9217		0,3867
14	12	29	12	2007	112,22	3160	7,2572		0,3886
20	36	29	12	2007	112,25	3544	7,6855		0,3905
13	12	31	12	2007	112,3	5980	9,9833		0,3937
15	28	2	1	2008	112,42	8996	12,2447		0,4014
13	3	3	1	2008	112,42	10291	13,0964		0,4014
12	46	4	1	2008	112,42	11714	13,9726		0,4014
13	32	10	1	2008	112,49	20400	18,4391		0,4059
12	49	14	1	2008	112,52	26117	20,8634		0,4078

Quadro A4.24 – Absorção de água por capilaridade, provete AM1 12 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	33	27	12	2007	113,64	0	0,0000	15,89	0,0000
9	54	27	12	2007	114,48	21	0,5916		0,0528
10	13	27	12	2007	114,77	40	0,8165		0,0711
10	31	27	12	2007	115,09	58	0,9832		0,0912
10	45	27	12	2007	115,35	72	1,0954		0,1076
10	59	27	12	2007	115,57	86	1,1972		0,1214
11	34	27	12	2007	116,06	121	1,4201		0,1523
12	25	27	12	2007	116,73	172	1,6931		0,1944
14	3	27	12	2007	117,77	270	2,1213		0,2598
16	52	27	12	2007	118,94	439	2,7049		0,3334
20	18	27	12	2007	119,62	645	3,2787		0,3762
0	58	28	12	2007	120,05	925	3,9264		0,4033
10	48	28	12	2007	120,24	1515	5,0249		0,4152
16	19	28	12	2007	120,28	1846	5,5468		0,4178
20	37	28	12	2007	120,27	2104	5,9217		0,4171
14	12	29	12	2007	120,33	3159	7,2560		0,4209
20	37	29	12	2007	120,38	3544	7,6855		0,4240
13	12	31	12	2007	120,42	5979	9,9825		0,4266
15	29	2	1	2008	120,52	8996	12,2447		0,4329
13	3	3	1	2008	120,51	10290	13,0958		0,4322
12	47	4	1	2008	120,53	11714	13,9726		0,4335
13	32	10	1	2008	120,59	20399	18,4386		0,4373
12	50	14	1	2008	120,64	26117	20,8634		0,4404

Quadro A4.25 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 1 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	23	27	12	2007	152,8	0	0,0000	16,06	0,0000
9	46	27	12	2007	154,37	23	0,6191		0,0977
10	5	27	12	2007	154,98	42	0,8367		0,1357
10	24	27	12	2007	155,52	61	1,0083		0,1693
10	39	27	12	2007	155,87	76	1,1255		0,1911
10	53	27	12	2007	156,18	90	1,2247		0,2104
11	19	27	12	2007	156,71	116	1,3904		0,2434
12	8	27	12	2007	157,56	165	1,6583		0,2963
13	48	27	12	2007	158,87	265	2,1016		0,3779
16	37	27	12	2007	160,3	434	2,6895		0,4669
20	4	27	12	2007	161,22	641	3,2685		0,5242
0	45	28	12	2007	161,83	922	3,9200		0,5621
10	36	28	12	2007	162,17	1513	5,0216		0,5833
16	6	28	12	2007	162,2	1843	5,5423		0,5852
20	25	28	12	2007	162,22	2102	5,9189		0,5864
14	1	29	12	2007	162,29	3158	7,2549		0,5908
20	26	29	12	2007	162,32	3543	7,6844		0,5926
13	0	31	12	2007	162,42	5977	9,9808		0,5989
15	17	2	1	2008	162,5	8994	12,2434		0,6038
12	53	3	1	2008	162,53	10290	13,0958		0,6057
12	36	4	1	2008	162,57	11713	13,9720		0,6082
13	22	10	1	2008	162,67	20399	18,4386		0,6144
12	38	14	1	2008	162,72	26115	20,8626		0,6175

Quadro A4.26 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 2 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	24	27	12	2007	155,63	0	0,0000	16,16	0,0000
9	46	27	12	2007	157,53	22	0,6055		0,1176
10	5	27	12	2007	158,22	41	0,8266		0,1603
10	24	27	12	2007	158,81	60	1,0000		0,1968
10	39	27	12	2007	159,23	75	1,1180		0,2228
10	53	27	12	2007	159,58	89	1,2179		0,2445
11	20	27	12	2007	160,18	116	1,3904		0,2816
12	9	27	12	2007	161,08	165	1,6583		0,3373
13	49	27	12	2007	162,4	265	2,1016		0,4191
16	38	27	12	2007	163,69	434	2,6895		0,4989
20	4	27	12	2007	164,45	640	3,2660		0,5459
0	46	28	12	2007	164,89	922	3,9200		0,5732
10	36	28	12	2007	165,01	1512	5,0200		0,5806
16	7	28	12	2007	165,02	1843	5,5423		0,5812
20	25	28	12	2007	165,04	2101	5,9175		0,5825
14	2	29	12	2007	165,1	3158	7,2549		0,5862
20	27	29	12	2007	165,15	3543	7,6844		0,5893
13	1	31	12	2007	165,23	5977	9,9808		0,5942
15	18	2	1	2008	165,32	8994	12,2434		0,5998
12	54	3	1	2008	165,34	10290	13,0958		0,6010
12	36	4	1	2008	165,37	11712	13,9714		0,6029
13	22	10	1	2008	165,48	20398	18,4382		0,6097
12	39	14	1	2008	165,55	26115	20,8626		0,6140

Quadro A4.27 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 3 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	24	27	12	2007	155,71	0	0,0000	16,27	0,0000
9	47	27	12	2007	157,6	23	0,6191		0,1162
10	5	27	12	2007	158,24	41	0,8266		0,1555
10	24	27	12	2007	158,8	60	1,0000		0,1899
10	39	27	12	2007	159,24	75	1,1180		0,2170
10	53	27	12	2007	159,6	89	1,2179		0,2391
11	20	27	12	2007	160,2	116	1,3904		0,2760
12	9	27	12	2007	161,1	165	1,6583		0,3313
13	49	27	12	2007	162,46	265	2,1016		0,4149
16	38	27	12	2007	163,82	434	2,6895		0,4985
20	5	27	12	2007	164,55	641	3,2685		0,5434
0	47	28	12	2007	165,01	923	3,9222		0,5716
10	37	28	12	2007	165,13	1513	5,0216		0,5790
16	7	28	12	2007	165,15	1843	5,5423		0,5803
20	26	28	12	2007	165,16	2102	5,9189		0,5809
14	2	29	12	2007	165,23	3158	7,2549		0,5852
20	27	29	12	2007	165,27	3543	7,6844		0,5876
13	1	31	12	2007	165,36	5977	9,9808		0,5932
15	18	2	1	2008	165,42	8994	12,2434		0,5968
12	54	3	1	2008	165,45	10290	13,0958		0,5987
12	37	4	1	2008	165,49	11713	13,9720		0,6012
13	23	10	1	2008	165,58	20399	18,4386		0,6067
12	40	14	1	2008	165,64	26116	20,8630		0,6104

Quadro A4.28 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 4 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	24	27	12	2007	158,53	0	0,0000	16,26	0,0000
9	47	27	12	2007	160,44	23	0,6191		0,1174
10	6	27	12	2007	161,07	42	0,8367		0,1562
10	25	27	12	2007	161,64	61	1,0083		0,1912
10	40	27	12	2007	162,06	76	1,1255		0,2170
10	54	27	12	2007	162,41	90	1,2247		0,2386
11	21	27	12	2007	162,98	117	1,3964		0,2736
12	10	27	12	2007	163,86	166	1,6633		0,3277
13	50	27	12	2007	165,15	266	2,1055		0,4070
16	39	27	12	2007	166,35	435	2,6926		0,4808
20	5	27	12	2007	167,11	641	3,2685		0,5275
0	47	28	12	2007	167,64	923	3,9222		0,5601
10	37	28	12	2007	167,8	1513	5,0216		0,5699
16	7	28	12	2007	167,83	1843	5,5423		0,5718
20	26	28	12	2007	167,88	2102	5,9189		0,5749
14	3	29	12	2007	167,92	3159	7,2560		0,5773
20	28	29	12	2007	167,96	3544	7,6855		0,5798
13	2	31	12	2007	168,04	5978	9,9816		0,5847
15	19	2	1	2008	168,14	8995	12,2440		0,5908
12	55	3	1	2008	168,14	10291	13,0964		0,5908
12	37	4	1	2008	168,18	11713	13,9720		0,5933
13	23	10	1	2008	168,28	20399	18,4386		0,5995
12	40	14	1	2008	168,33	26116	20,8630		0,6025

Quadro A4.29 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 5 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	25	27	12	2007	157,98	0	0,0000	16,33	0,0000
9	48	27	12	2007	159,41	23	0,6191		0,0876
10	6	27	12	2007	159,83	41	0,8266		0,1133
10	25	27	12	2007	160,23	60	1,0000		0,1378
10	40	27	12	2007	160,51	75	1,1180		0,1549
10	54	27	12	2007	160,76	89	1,2179		0,1703
11	22	27	12	2007	161,17	117	1,3964		0,1954
12	10	27	12	2007	161,83	165	1,6583		0,2358
13	51	27	12	2007	162,89	266	2,1055		0,3007
16	40	27	12	2007	164,04	435	2,6926		0,3711
20	6	27	12	2007	164,92	641	3,2685		0,4250
0	48	28	12	2007	165,64	923	3,9222		0,4691
10	38	28	12	2007	166,11	1513	5,0216		0,4979
16	8	28	12	2007	166,19	1843	5,5423		0,5028
20	27	28	12	2007	166,22	2102	5,9189		0,5046
14	3	29	12	2007	166,33	3158	7,2549		0,5114
20	28	29	12	2007	166,36	3543	7,6844		0,5132
13	3	31	12	2007	166,44	5978	9,9816		0,5181
15	19	2	1	2008	166,54	8994	12,2434		0,5242
12	55	3	1	2008	166,54	10290	13,0958		0,5242
12	38	4	1	2008	166,55	11713	13,9720		0,5249
13	24	10	1	2008	166,65	20399	18,4386		0,5310
12	41	14	1	2008	166,7	26116	20,8630		0,5340

Quadro A4.30 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 6 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	25	27	12	2007	156,13	0	0,0000	16,34	0,0000
9	48	27	12	2007	157,68	23	0,6191		0,0948
10	7	27	12	2007	158,23	42	0,8367		0,1285
10	25	27	12	2007	158,75	60	1,0000		0,1603
10	40	27	12	2007	159,13	75	1,1180		0,1836
10	54	27	12	2007	159,46	89	1,2179		0,2038
11	22	27	12	2007	159,97	117	1,3964		0,2350
12	11	27	12	2007	160,75	166	1,6633		0,2827
13	51	27	12	2007	161,95	266	2,1055		0,3561
16	41	27	12	2007	163,22	436	2,6957		0,4339
20	6	27	12	2007	164	641	3,2685		0,4816
0	48	28	12	2007	164,48	923	3,9222		0,5110
10	39	28	12	2007	164,7	1514	5,0233		0,5244
16	9	28	12	2007	164,72	1844	5,5438		0,5256
20	27	28	12	2007	164,73	2102	5,9189		0,5263
14	4	29	12	2007	164,82	3159	7,2560		0,5318
20	29	29	12	2007	164,85	3544	7,6855		0,5336
13	3	31	12	2007	164,92	5978	9,9816		0,5379
15	20	2	1	2008	165,03	8995	12,2440		0,5446
12	56	3	1	2008	165,02	10291	13,0964		0,5440
12	38	4	1	2008	165,09	11713	13,9720		0,5483
13	24	10	1	2008	165,14	20399	18,4386		0,5513
12	41	14	1	2008	165,19	26116	20,8630		0,5544

Quadro A4.31 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 7 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	25	27	12	2007	117,19	0	0,0000	16,36	0,0000
9	48	27	12	2007	118,45	23	0,6191		0,0770
10	7	27	12	2007	119,02	42	0,8367		0,1119
10	25	27	12	2007	119,59	60	1,0000		0,1467
10	40	27	12	2007	119,96	75	1,1180		0,1693
10	54	27	12	2007	120,3	89	1,2179		0,1901
11	23	27	12	2007	120,86	118	1,4024		0,2244
12	12	27	12	2007	121,64	167	1,6683		0,2720
13	52	27	12	2007	122,72	267	2,1095		0,3381
16	41	27	12	2007	123,66	436	2,6957		0,3955
20	7	27	12	2007	124,08	642	3,2711		0,4212
0	49	28	12	2007	124,22	924	3,9243		0,4298
10	39	28	12	2007	124,31	1514	5,0233		0,4353
16	9	28	12	2007	124,33	1844	5,5438		0,4365
20	28	28	12	2007	124,33	2103	5,9203		0,4365
14	4	29	12	2007	124,39	3159	7,2560		0,4402
20	29	29	12	2007	124,42	3544	7,6855		0,4420
13	4	31	12	2007	124,5	5979	9,9825		0,4469
15	20	2	1	2008	124,55	8995	12,2440		0,4499
12	56	3	1	2008	124,56	10291	13,0964		0,4506
12	39	4	1	2008	124,6	11714	13,9726		0,4530
13	24	10	1	2008	124,65	20399	18,4386		0,4561
12	41	14	1	2008	124,7	26116	20,8630		0,4591

Quadro A4.32 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 8 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	26	27	12	2007	100,16	0	0,0000	16,36	0,0000
9	49	27	12	2007	101,28	23	0,6191		0,0685
10	7	27	12	2007	101,7	41	0,8266		0,0941
10	26	27	12	2007	102,13	60	1,0000		0,1204
10	41	27	12	2007	102,45	75	1,1180		0,1400
10	55	27	12	2007	102,72	89	1,2179		0,1565
11	24	27	12	2007	103,16	118	1,4024		0,1834
12	13	27	12	2007	103,79	167	1,6683		0,2219
13	53	27	12	2007	104,71	267	2,1095		0,2781
16	42	27	12	2007	105,67	436	2,6957		0,3368
20	8	27	12	2007	106,16	642	3,2711		0,3667
0	50	28	12	2007	106,34	924	3,9243		0,3777
10	40	28	12	2007	106,4	1514	5,0233		0,3814
16	10	28	12	2007	106,41	1844	5,5438		0,3820
20	28	28	12	2007	106,41	2102	5,9189		0,3820
14	5	29	12	2007	106,46	3159	7,2560		0,3851
20	29	29	12	2007	106,48	3543	7,6844		0,3863
13	4	31	12	2007	106,55	5978	9,9816		0,3906
15	21	2	1	2008	106,59	8995	12,2440		0,3930
12	56	3	1	2008	106,62	10290	13,0958		0,3948
12	39	4	1	2008	106,63	11713	13,9720		0,3954
13	25	10	1	2008	106,7	20399	18,4386		0,3997
12	42	14	1	2008	106,75	26116	20,8630		0,4028

Quadro A4.33 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 9 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	26	27	12	2007	101,45	0	0,0000	15,77	0,0000
9	49	27	12	2007	102,69	23	0,6191		0,0786
10	7	27	12	2007	103,13	41	0,8266		0,1065
10	26	27	12	2007	103,53	60	1,0000		0,1319
10	41	27	12	2007	103,82	75	1,1180		0,1503
10	55	27	12	2007	104,05	89	1,2179		0,1649
11	24	27	12	2007	104,44	118	1,4024		0,1896
12	14	27	12	2007	104,99	168	1,6733		0,2245
13	53	27	12	2007	105,79	267	2,1095		0,2752
16	43	27	12	2007	106,59	437	2,6988		0,3259
20	8	27	12	2007	107,1	642	3,2711		0,3583
0	50	28	12	2007	107,44	924	3,9243		0,3798
10	40	28	12	2007	107,54	1514	5,0233		0,3862
16	10	28	12	2007	107,57	1844	5,5438		0,3881
20	29	28	12	2007	107,57	2103	5,9203		0,3881
14	5	29	12	2007	107,62	3159	7,2560		0,3912
20	30	29	12	2007	107,66	3544	7,6855		0,3938
13	5	31	12	2007	107,71	5979	9,9825		0,3969
15	21	2	1	2008	107,79	8995	12,2440		0,4020
12	57	3	1	2008	107,78	10291	13,0964		0,4014
12	40	4	1	2008	107,8	11714	13,9726		0,4026
13	25	10	1	2008	107,88	20399	18,4386		0,4077
12	43	14	1	2008	107,94	26117	20,8634		0,4115

Quadro A4.34 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 10 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	26	27	12	2007	98,76	0	0,0000	16,21	0,0000
9	49	27	12	2007	100,18	23	0,6191		0,0876
10	8	27	12	2007	100,78	42	0,8367		0,1246
10	27	27	12	2007	101,38	61	1,0083		0,1616
10	41	27	12	2007	101,78	75	1,1180		0,1863
10	55	27	12	2007	102,12	89	1,2179		0,2073
11	25	27	12	2007	102,67	119	1,4083		0,2412
12	15	27	12	2007	103,35	169	1,6783		0,2832
13	54	27	12	2007	104,19	268	2,1134		0,3350
16	43	27	12	2007	104,84	437	2,6988		0,3751
20	9	27	12	2007	105,12	643	3,2736		0,3924
0	51	28	12	2007	105,17	925	3,9264		0,3955
10	41	28	12	2007	105,22	1515	5,0249		0,3986
16	11	28	12	2007	105,25	1845	5,5453		0,4004
20	29	28	12	2007	105,25	2103	5,9203		0,4004
14	6	29	12	2007	105,31	3160	7,2572		0,4041
20	30	29	12	2007	105,34	3544	7,6855		0,4060
13	5	31	12	2007	105,4	5979	9,9825		0,4097
15	21	2	1	2008	105,47	8995	12,2440		0,4140
12	57	3	1	2008	105,47	10291	13,0964		0,4140
12	40	4	1	2008	105,5	11714	13,9726		0,4158
13	26	10	1	2008	105,57	20400	18,4391		0,4201
12	43	14	1	2008	105,6	26117	20,8634		0,4220

Quadro A4.35 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 11 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	27	27	12	2007	115,34	0	0,0000	15,80	0,0000
9	50	27	12	2007	116,48	23	0,6191		0,0721
10	8	27	12	2007	116,92	41	0,8266		0,1000
10	27	27	12	2007	117,36	60	1,0000		0,1278
10	41	27	12	2007	117,67	74	1,1106		0,1474
10	56	27	12	2007	117,96	89	1,2179		0,1658
11	25	27	12	2007	118,46	118	1,4024		0,1974
12	15	27	12	2007	119,19	168	1,6733		0,2436
13	54	27	12	2007	120,32	267	2,1095		0,3151
16	44	27	12	2007	121,44	437	2,6988		0,3860
20	9	27	12	2007	122,06	642	3,2711		0,4252
0	51	28	12	2007	122,32	924	3,9243		0,4417
10	41	28	12	2007	122,38	1514	5,0233		0,4454
16	11	28	12	2007	122,41	1844	5,5438		0,4473
20	30	28	12	2007	122,42	2103	5,9203		0,4480
14	6	29	12	2007	122,48	3159	7,2560		0,4518
20	31	29	12	2007	122,52	3544	7,6855		0,4543
13	6	31	12	2007	122,57	5979	9,9825		0,4575
15	22	2	1	2008	122,64	8995	12,2440		0,4619
12	58	3	1	2008	122,65	10291	13,0964		0,4625
12	41	4	1	2008	122,67	11714	13,9726		0,4638
13	26	10	1	2008	122,77	20399	18,4386		0,4701
12	44	14	1	2008	122,8	26117	20,8634		0,4720

Quadro A4.36 – Absorção de água por capilaridade, provete AM0 12 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	27	27	12	2007	117,96	0	0,0000	16,20	0,0000
9	50	27	12	2007	119,17	23	0,6191		0,0747
10	9	27	12	2007	119,59	42	0,8367		0,1006
10	27	27	12	2007	120	60	1,0000		0,1260
10	42	27	12	2007	120,31	75	1,1180		0,1451
10	56	27	12	2007	120,58	89	1,2179		0,1618
11	26	27	12	2007	121,08	119	1,4083		0,1926
12	16	27	12	2007	121,8	169	1,6783		0,2371
13	55	27	12	2007	122,88	268	2,1134		0,3038
16	44	27	12	2007	124,01	437	2,6988		0,3735
20	10	27	12	2007	124,68	643	3,2736		0,4149
0	52	28	12	2007	124,96	925	3,9264		0,4322
10	42	28	12	2007	125,02	1515	5,0249		0,4359
16	12	28	12	2007	125,06	1845	5,5453		0,4384
20	30	28	12	2007	125,07	2103	5,9203		0,4390
14	7	29	12	2007	125,13	3160	7,2572		0,4427
20	31	29	12	2007	125,15	3544	7,6855		0,4439
13	6	31	12	2007	125,22	5979	9,9825		0,4482
15	22	2	1	2008	125,3	8995	12,2440		0,4532
12	58	3	1	2008	125,3	10291	13,0964		0,4532
12	41	4	1	2008	125,34	11714	13,9726		0,4557
13	27	10	1	2008	125,41	20400	18,4391		0,4600
12	44	14	1	2008	125,48	26117	20,8634		0,4643

Quadro A4.37 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 1 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	33	27	12	2007	153,26	0	0,0000	16,67	0,0000
9	54	27	12	2007	155,57	21	0,5916		0,1385
10	13	27	12	2007	156,32	40	0,8165		0,1835
10	31	27	12	2007	156,93	58	0,9832		0,2201
10	45	27	12	2007	157,36	72	1,0954		0,2459
11	0	27	12	2007	157,79	87	1,2042		0,2717
11	34	27	12	2007	158,54	121	1,4201		0,3166
12	26	27	12	2007	159,45	173	1,6980		0,3712
14	4	27	12	2007	160,75	271	2,1252		0,4492
16	53	27	12	2007	162,06	440	2,7080		0,5277
20	19	27	12	2007	162,66	646	3,2813		0,5637
0	59	28	12	2007	162,81	926	3,9285		0,5727
10	49	28	12	2007	162,9	1516	5,0266		0,5781
16	19	28	12	2007	162,95	1846	5,5468		0,5811
20	37	28	12	2007	162,94	2104	5,9217		0,5805
14	13	29	12	2007	163,02	3160	7,2572		0,5853
20	37	29	12	2007	163,09	3544	7,6855		0,5895
13	13	31	12	2007	163,17	5980	9,9833		0,5943
15	29	2	1	2008	163,27	8996	12,2447		0,6003
13	4	3	1	2008	163,29	10291	13,0964		0,6015
12	47	4	1	2008	163,32	11714	13,9726		0,6033
13	33	10	1	2008	163,44	20400	18,4391		0,6105
12	50	14	1	2008	163,52	26117	20,8634		0,6153

Quadro A4.38 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 2 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	34	27	12	2007	155,14	0	0,0000	16,52	0,0000
9	55	27	12	2007	157,07	21	0,5916		0,1168
10	14	27	12	2007	157,79	40	0,8165		0,1604
10	31	27	12	2007	158,36	57	0,9747		0,1949
10	46	27	12	2007	158,78	72	1,0954		0,2203
11	0	27	12	2007	159,15	86	1,1972		0,2427
11	35	27	12	2007	159,86	121	1,4201		0,2856
12	27	27	12	2007	160,68	173	1,6980		0,3353
14	4	27	12	2007	161,79	270	2,1213		0,4025
16	54	27	12	2007	163,05	440	2,7080		0,4787
20	19	27	12	2007	164,08	645	3,2787		0,5410
1	0	28	12	2007	164,74	926	3,9285		0,5810
10	49	28	12	2007	164,9	1515	5,0249		0,5907
16	20	28	12	2007	164,94	1846	5,5468		0,5931
20	38	28	12	2007	165,01	2104	5,9217		0,5973
14	14	29	12	2007	165,04	3160	7,2572		0,5991
20	38	29	12	2007	165,06	3544	7,6855		0,6003
13	13	31	12	2007	165,18	5979	9,9825		0,6076
15	30	2	1	2008	165,28	8996	12,2447		0,6137
13	4	3	1	2008	165,29	10290	13,0958		0,6143
12	47	4	1	2008	165,33	11713	13,9720		0,6167
13	33	10	1	2008	165,46	20399	18,4386		0,6246
12	51	14	1	2008	165,51	26117	20,8634		0,6276

Quadro A4.39 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 3 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	34	27	12	2007	157	0	0,0000	16,55	0,0000
9	55	27	12	2007	159,28	21	0,5916		0,1377
10	14	27	12	2007	160,08	40	0,8165		0,1861
10	32	27	12	2007	160,67	58	0,9832		0,2217
10	46	27	12	2007	161,1	72	1,0954		0,2477
11	0	27	12	2007	161,47	86	1,1972		0,2701
11	36	27	12	2007	162,27	122	1,4259		0,3184
12	27	27	12	2007	163,21	173	1,6980		0,3752
14	5	27	12	2007	164,5	271	2,1252		0,4531
16	54	27	12	2007	165,84	440	2,7080		0,5341
20	20	27	12	2007	166,68	646	3,2813		0,5848
1	0	28	12	2007	166,89	926	3,9285		0,5975
10	50	28	12	2007	166,98	1516	5,0266		0,6029
16	20	28	12	2007	167,01	1846	5,5468		0,6048
20	38	28	12	2007	167,01	2104	5,9217		0,6048
14	17	29	12	2007	167,11	3163	7,2606		0,6108
20	38	29	12	2007	167,15	3544	7,6855		0,6132
13	14	31	12	2007	167,25	5980	9,9833		0,6193
15	30	2	1	2008	167,35	8996	12,2447		0,6253
13	5	3	1	2008	167,41	10291	13,0964		0,6289
12	48	4	1	2008	167,41	11714	13,9726		0,6289
13	34	10	1	2008	167,54	20400	18,4391		0,6368
12	51	14	1	2008	167,61	26117	20,8634		0,6410

Quadro A4.40 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 4 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	34	27	12	2007	155,44	0	0,0000	16,39	0,0000
9	55	27	12	2007	157,48	21	0,5916		0,1245
10	14	27	12	2007	158,37	40	0,8165		0,1788
10	32	27	12	2007	158,97	58	0,9832		0,2154
10	46	27	12	2007	159,38	72	1,0954		0,2404
11	0	27	12	2007	159,75	86	1,1972		0,2630
11	36	27	12	2007	160,53	122	1,4259		0,3106
12	28	27	12	2007	161,4	174	1,7029		0,3637
14	6	27	12	2007	162,65	272	2,1292		0,4400
16	55	27	12	2007	163,93	441	2,7111		0,5181
20	20	27	12	2007	164,61	646	3,2813		0,5596
1	1	28	12	2007	164,86	927	3,9306		0,5749
10	50	28	12	2007	164,99	1516	5,0266		0,5828
16	21	28	12	2007	165,01	1847	5,5483		0,5840
20	39	28	12	2007	165,01	2105	5,9231		0,5840
14	17	29	12	2007	165,09	3163	7,2606		0,5889
20	39	29	12	2007	165,14	3545	7,6866		0,5920
13	14	31	12	2007	165,25	5980	9,9833		0,5987
15	31	2	1	2008	165,35	8997	12,2454		0,6048
13	5	3	1	2008	165,37	10291	13,0964		0,6060
12	48	4	1	2008	165,39	11714	13,9726		0,6072
13	34	10	1	2008	165,53	20400	18,4391		0,6158
12	51	14	1	2008	165,57	26117	20,8634		0,6182

Quadro A4.41 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 5 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	35	27	12	2007	156,97	0	0,0000	16,15	0,0000
9	55	27	12	2007	158,75	20	0,5774		0,1102
10	15	27	12	2007	159,45	40	0,8165		0,1535
10	32	27	12	2007	160	57	0,9747		0,1876
10	46	27	12	2007	160,4	71	1,0878		0,2123
11	1	27	12	2007	160,76	86	1,1972		0,2346
11	37	27	12	2007	161,54	122	1,4259		0,2829
12	29	27	12	2007	162,39	174	1,7029		0,3355
14	6	27	12	2007	163,66	271	2,1252		0,4141
16	55	27	12	2007	165,11	440	2,7080		0,5039
20	21	27	12	2007	165,95	646	3,2813		0,5559
1	1	28	12	2007	166,23	926	3,9285		0,5732
10	51	28	12	2007	166,35	1516	5,0266		0,5806
16	21	28	12	2007	166,39	1846	5,5468		0,5831
20	39	28	12	2007	166,39	2104	5,9217		0,5831
14	18	29	12	2007	166,47	3163	7,2606		0,5881
20	39	29	12	2007	166,52	3544	7,6855		0,5912
13	15	31	12	2007	166,6	5980	9,9833		0,5961
15	31	2	1	2008	166,72	8996	12,2447		0,6035
13	6	3	1	2008	166,73	10291	13,0964		0,6042
12	49	4	1	2008	166,77	11714	13,9726		0,6066
13	34	10	1	2008	166,87	20399	18,4386		0,6128
12	52	14	1	2008	166,94	26117	20,8634		0,6172

Quadro A4.42 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 6 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	35	27	12	2007	151,25	0	0,0000	16,48	0,0000
9	56	27	12	2007	152,85	21	0,5916		0,0971
10	15	27	12	2007	153,46	40	0,8165		0,1341
10	32	27	12	2007	153,97	57	0,9747		0,1651
10	47	27	12	2007	154,31	72	1,0954		0,1857
11	1	27	12	2007	154,65	86	1,1972		0,2063
11	39	27	12	2007	155,36	124	1,4376		0,2494
12	29	27	12	2007	156,17	174	1,7029		0,2986
14	7	27	12	2007	157,34	272	2,1292		0,3696
16	56	27	12	2007	158,64	441	2,7111		0,4485
20	22	27	12	2007	159,6	647	3,2838		0,5067
1	2	28	12	2007	160,2	927	3,9306		0,5431
10	51	28	12	2007	160,38	1516	5,0266		0,5541
16	22	28	12	2007	160,41	1847	5,5483		0,5559
20	40	28	12	2007	160,43	2105	5,9231		0,5571
14	18	29	12	2007	160,5	3163	7,2606		0,5614
20	40	29	12	2007	160,54	3545	7,6866		0,5638
13	15	31	12	2007	160,63	5980	9,9833		0,5692
15	31	2	1	2008	160,74	8996	12,2447		0,5759
13	6	3	1	2008	160,75	10291	13,0964		0,5765
12	49	4	1	2008	160,79	11714	13,9726		0,5790
13	35	10	1	2008	160,89	20400	18,4391		0,5850
12	52	14	1	2008	160,96	26117	20,8634		0,5893

Quadro A4.43 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 7 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	35	27	12	2007	109,66	0	0,0000	16,73	0,0000
9	56	27	12	2007	110,72	21	0,5916		0,0634
10	15	27	12	2007	111,14	40	0,8165		0,0885
10	33	27	12	2007	111,54	58	0,9832		0,1124
10	47	27	12	2007	111,79	72	1,0954		0,1273
11	1	27	12	2007	112,04	86	1,1972		0,1423
11	40	27	12	2007	112,61	125	1,4434		0,1764
12	30	27	12	2007	113,24	175	1,7078		0,2140
14	8	27	12	2007	114,18	273	2,1331		0,2702
16	57	27	12	2007	115,17	442	2,7142		0,3294
20	22	27	12	2007	115,85	647	3,2838		0,3700
1	2	28	12	2007	116,15	927	3,9306		0,3880
10	52	28	12	2007	116,2	1517	5,0283		0,3910
16	22	28	12	2007	116,26	1847	5,5483		0,3945
20	40	28	12	2007	116,26	2105	5,9231		0,3945
14	19	29	12	2007	116,31	3164	7,2618		0,3975
20	40	29	12	2007	116,34	3545	7,6866		0,3993
13	16	31	12	2007	116,41	5981	9,9842		0,4035
15	32	2	1	2008	116,48	8997	12,2454		0,4077
13	7	3	1	2008	116,5	10292	13,0971		0,4089
12	50	4	1	2008	116,53	11715	13,9732		0,4107
13	35	10	1	2008	116,62	20400	18,4391		0,4161
12	52	14	1	2008	116,66	26117	20,8634		0,4185

Quadro A4.44 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 8 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	36	27	12	2007	120,51	0	0,0000	16,48	0,0000
9	56	27	12	2007	121,77	20	0,5774		0,0765
10	15	27	12	2007	122,33	39	0,8062		0,1105
10	33	27	12	2007	122,85	57	0,9747		0,1420
10	47	27	12	2007	123,21	71	1,0878		0,1639
11	1	27	12	2007	123,56	85	1,1902		0,1851
11	41	27	12	2007	124,35	125	1,4434		0,2331
12	30	27	12	2007	125,22	174	1,7029		0,2859
14	8	27	12	2007	126,4	272	2,1292		0,3575
16	57	27	12	2007	127,38	441	2,7111		0,4170
20	23	27	12	2007	127,76	647	3,2838		0,4401
1	3	28	12	2007	127,81	927	3,9306		0,4431
10	52	28	12	2007	127,86	1516	5,0266		0,4461
16	23	28	12	2007	127,91	1847	5,5483		0,4492
20	41	28	12	2007	127,94	2105	5,9231		0,4510
14	19	29	12	2007	127,96	3163	7,2606		0,4522
20	40	29	12	2007	128,02	3544	7,6855		0,4558
13	16	31	12	2007	128,08	5980	9,9833		0,4595
15	32	2	1	2008	128,14	8996	12,2447		0,4631
13	7	3	1	2008	128,18	10291	13,0964		0,4656
12	50	4	1	2008	128,23	11714	13,9726		0,4686
13	36	10	1	2008	128,29	20400	18,4391		0,4722
12	52	14	1	2008	128,39	26116	20,8630		0,4783

Quadro A4.45 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 9 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	36	27	12	2007	111,43	0	0,0000	16,20	0,0000
9	57	27	12	2007	112,72	21	0,5916		0,0796
10	16	27	12	2007	113,33	40	0,8165		0,1173
10	34	27	12	2007	113,9	58	0,9832		0,1525
10	48	27	12	2007	114,28	72	1,0954		0,1760
11	2	27	12	2007	114,65	86	1,1972		0,1988
11	41	27	12	2007	115,48	125	1,4434		0,2501
12	31	27	12	2007	116,29	175	1,7078		0,3001
14	9	27	12	2007	117,3	273	2,1331		0,3624
16	58	27	12	2007	118,02	442	2,7142		0,4069
20	23	27	12	2007	118,3	647	3,2838		0,4242
1	3	28	12	2007	118,35	927	3,9306		0,4273
10	53	28	12	2007	118,39	1517	5,0283		0,4297
16	24	28	12	2007	118,42	1848	5,5498		0,4316
20	41	28	12	2007	118,44	2105	5,9231		0,4328
14	20	29	12	2007	118,49	3164	7,2618		0,4359
20	41	29	12	2007	118,52	3545	7,6866		0,4377
13	17	31	12	2007	118,58	5981	9,9842		0,4415
15	33	2	1	2008	118,64	8997	12,2454		0,4452
13	8	3	1	2008	118,68	10292	13,0971		0,4476
12	50	4	1	2008	118,71	11714	13,9726		0,4495
13	36	10	1	2008	118,81	20400	18,4391		0,4557
12	53	14	1	2008	118,87	26117	20,8634		0,4594

Quadro A4.46 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 10 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	36	27	12	2007	115,82	0	0,0000	16,38	0,0000
9	57	27	12	2007	116,97	21	0,5916		0,0702
10	16	27	12	2007	117,52	40	0,8165		0,1038
10	34	27	12	2007	117,98	58	0,9832		0,1319
10	48	27	12	2007	118,37	72	1,0954		0,1557
11	2	27	12	2007	118,71	86	1,1972		0,1764
11	42	27	12	2007	119,58	126	1,4491		0,2296
12	32	27	12	2007	120,47	176	1,7127		0,2839
14	9	27	12	2007	121,61	273	2,1331		0,3535
16	58	27	12	2007	122,47	442	2,7142		0,4060
20	25	27	12	2007	122,88	649	3,2889		0,4310
1	4	28	12	2007	122,97	928	3,9328		0,4365
10	53	28	12	2007	123,06	1517	5,0283		0,4420
16	24	28	12	2007	123,08	1848	5,5498		0,4432
20	41	28	12	2007	123,09	2105	5,9231		0,4438
14	20	29	12	2007	123,15	3164	7,2618		0,4475
20	41	29	12	2007	123,19	3545	7,6866		0,4499
13	17	31	12	2007	123,23	5981	9,9842		0,4524
15	33	2	1	2008	123,32	8997	12,2454		0,4579
13	8	3	1	2008	123,35	10292	13,0971		0,4597
12	51	4	1	2008	123,37	11715	13,9732		0,4609
13	36	10	1	2008	123,49	20400	18,4391		0,4683
12	53	14	1	2008	123,51	26117	20,8634		0,4695

Quadro A4.47 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 11 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	37	27	12	2007	104,02	0	0,0000	16,25	0,0000
9	57	27	12	2007	105,01	20	0,5774		0,0609
10	16	27	12	2007	105,5	39	0,8062		0,0911
10	34	27	12	2007	105,93	57	0,9747		0,1175
10	48	27	12	2007	106,3	71	1,0878		0,1403
11	2	27	12	2007	106,67	85	1,1902		0,1631
11	42	27	12	2007	107,52	125	1,4434		0,2154
12	32	27	12	2007	108,35	175	1,7078		0,2665
14	10	27	12	2007	109,34	273	2,1331		0,3274
16	59	27	12	2007	110,07	442	2,7142		0,3723
20	25	27	12	2007	110,36	648	3,2863		0,3901
1	4	28	12	2007	110,4	927	3,9306		0,3926
10	54	28	12	2007	110,47	1517	5,0283		0,3969
16	25	28	12	2007	110,49	1848	5,5498		0,3981
20	42	28	12	2007	110,52	2105	5,9231		0,4000
14	21	29	12	2007	110,55	3164	7,2618		0,4018
20	42	29	12	2007	110,61	3545	7,6866		0,4055
13	18	31	12	2007	110,64	5981	9,9842		0,4074
15	34	2	1	2008	110,72	8997	12,2454		0,4123
13	8	3	1	2008	110,76	10291	13,0964		0,4148
12	51	4	1	2008	110,77	11714	13,9726		0,4154
13	37	10	1	2008	110,87	20400	18,4391		0,4215
12	53	14	1	2008	110,94	26116	20,8630		0,4258

Quadro A4.48 – Absorção de água por capilaridade, provete AM2 12 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso (g)	tempo (min)	tempo (horas ^{1/2})	Área (cm ²)	dW/S (g/cm ²)
9	37	27	12	2007	113,2	0	0,0000	16,21	0,0000
9	58	27	12	2007	114,2	21	0,5916		0,0617
10	17	27	12	2007	114,72	40	0,8165		0,0938
10	34	27	12	2007	115,21	57	0,9747		0,1240
10	48	27	12	2007	115,59	71	1,0878		0,1474
11	3	27	12	2007	115,94	86	1,1972		0,1690
11	43	27	12	2007	116,83	126	1,4491		0,2239
12	33	27	12	2007	117,74	176	1,7127		0,2800
14	10	27	12	2007	118,84	273	2,1331		0,3479
17	0	27	12	2007	119,73	443	2,7172		0,4028
20	26	27	12	2007	120,06	649	3,2889		0,4231
1	5	28	12	2007	120,14	928	3,9328		0,4281
10	54	28	12	2007	120,2	1517	5,0283		0,4318
16	25	28	12	2007	120,23	1848	5,5498		0,4336
20	42	28	12	2007	120,25	2105	5,9231		0,4349
14	21	29	12	2007	120,3	3164	7,2618		0,4379
20	42	29	12	2007	120,37	3545	7,6866		0,4423
13	18	31	12	2007	120,4	5981	9,9842		0,4441
15	34	2	1	2008	120,5	8997	12,2454		0,4503
13	9	3	1	2008	120,51	10292	13,0971		0,4509
12	52	4	1	2008	120,52	11715	13,9732		0,4515
13	37	10	1	2008	120,64	20400	18,4391		0,4589
12	54	14	1	2008	120,68	26117	20,8634		0,4614

A5

ANEXO 5 – ENSAIO DE EVAPORAÇÃO

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes no ensaio de evaporação.

Quadro A5.1 – Ensaio de evaporação, provete AMP 1.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
15	57	19	3	2008	167,94	16,61	0	0
17	41	19	3	2008	167,81		1,733333	-0,00783
18	11	19	3	2008	167,8		2,233333	-0,00843
18	46	19	3	2008	167,78		2,816667	-0,00963
19	38	19	3	2008	167,75		3,683333	-0,01144
21	36	19	3	2008	167,69		5,65	-0,01505
23	33	19	3	2008	167,66		7,6	-0,01686
10	18	20	3	2008	167,45		18,35	-0,0295
19	10	20	3	2008	167,31		27,21667	-0,03792
10	49	22	3	2008	166,8		66,86667	-0,06862
14	39	24	3	2008	166,28		118,7	-0,09993
13	3	25	3	2008	166,09		141,1	-0,11136
9	55	27	3	2008	165,74		185,9667	-0,13243
13	12	31	4	2008	165,15		285,25	-0,16795
13	39	4	4	2008	164,72		381,7	-0,19383
13	49	7	4	2008	164,41		453,8667	-0,21249
13	12	11	4	2008	164,13		549,25	-0,22935
13	34	14	4	2008	163,96		621,6167	-0,23958
11	28	17	4	2008	163,82		691,5167	-0,24801
8	29	21	4	2008	163,68		784,5333	-0,25644
14	46	25	4	2008	163,58		886,8167	-0,26246
13	6	28	4	2008	163,48		957,15	-0,26848
14	42	6	5	2008	163,44		1150,75	-0,27089

Quadro A5.2 – Ensaio de evaporação, provete AMP 2.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
15	58	19	3	2008	163,02	16,42	0	0
17	41	19	3	2008	162,86		1,716667	-0,00975
18	11	19	3	2008	162,84		2,216667	-0,01096
18	46	19	3	2008	162,81		2,8	-0,01279
19	39	19	3	2008	162,78		3,683333	-0,01462
21	37	19	3	2008	162,72		5,65	-0,01827
23	33	19	3	2008	162,68		7,583333	-0,02071
10	19	20	3	2008	162,48		18,35	-0,03289
19	10	20	3	2008	162,34		27,2	-0,04142
10	49	22	3	2008	161,86		66,85	-0,07066
14	39	24	3	2008	161,35		118,6833	-0,10173
13	4	25	3	2008	161,14		141,1	-0,11452
9	55	27	3	2008	160,75		185,95	-0,13828
13	12	31	4	2008	160,1		285,2333	-0,17788
13	39	4	4	2008	159,56		381,6833	-0,21077
13	49	7	4	2008	159,22		453,85	-0,23148
13	12	11	4	2008	158,92		549,2333	-0,24976
13	35	14	4	2008	158,75		621,6167	-0,26011
11	28	17	4	2008	158,61		691,5	-0,26864
8	30	21	4	2008	158,48		784,5333	-0,27656
14	46	25	4	2008	158,39		886,8	-0,28204
13	17	28	4	2008	158,31		957,3167	-0,28692
14	42	6	5	2008	158,28		1150,733	-0,28874

Quadro A5.3 – Ensaio de evaporação, provete AMP 3.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
15	58	19	3	2008	160,83	16,46	0	0
17	42	19	3	2008	160,72		1,733333	-0,00668
18	12	19	3	2008	160,7		2,233333	-0,0079
18	47	19	3	2008	160,68		2,816667	-0,00911
19	39	19	3	2008	160,65		3,683333	-0,01094
21	37	19	3	2008	160,6		5,65	-0,01398
23	34	19	3	2008	160,57		7,6	-0,0158
10	19	20	3	2008	160,39		18,35	-0,02674
19	11	20	3	2008	160,29		27,21667	-0,03281
10	49	22	3	2008	159,9		66,85	-0,05651
14	40	24	3	2008	159,48		118,7	-0,08203
13	4	25	3	2008	159,31		141,1	-0,09236
9	56	27	3	2008	159		185,9667	-0,1112
13	13	31	4	2008	158,4		285,25	-0,14766
13	40	4	4	2008	157,98		381,7	-0,17318
13	49	7	4	2008	157,72		453,85	-0,18898
13	13	11	4	2008	157,45		549,25	-0,20538
13	35	14	4	2008	157,28		621,6167	-0,21571
11	29	17	4	2008	157,13		691,5167	-0,22483
8	30	21	4	2008	156,98		784,5333	-0,23394
14	47	25	4	2008	156,85		886,8167	-0,24184
13	17	28	4	2008	156,76		957,3167	-0,24731
14	43	6	5	2008	156,72		1150,75	-0,24974

Quadro A5.4 – Ensaio de evaporação, provete AMP 4.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
15	59	19	3	2008	167,92	16,13	0	0
17	42	19	3	2008	167,81		1,716667	-0,00682
18	12	19	3	2008	167,79		2,216667	-0,00806
18	47	19	3	2008	167,76		2,8	-0,00992
19	39	19	3	2008	167,74		3,666667	-0,01116
21	38	19	3	2008	167,68		5,65	-0,01488
23	34	19	3	2008	167,66		7,583333	-0,01612
10	20	20	3	2008	167,5		18,35	-0,02604
19	11	20	3	2008	167,38		27,2	-0,03348
10	50	22	3	2008	166,96		66,85	-0,05952
14	40	24	3	2008	166,52		118,6833	-0,0868
13	4	25	3	2008	166,35		141,0833	-0,09734
9	56	27	3	2008	166		185,95	-0,11905
13	13	31	4	2008	165,34		285,2333	-0,15997
13	40	4	4	2008	164,82		381,6833	-0,19221
13	50	7	4	2008	164,5		453,85	-0,21205
13	14	11	4	2008	164,19		549,25	-0,23127
13	35	14	4	2008	164,01		621,6	-0,24243
11	29	17	4	2008	163,86		691,5	-0,25173
8	31	21	4	2008	163,7		784,5333	-0,26165
14	47	25	4	2008	163,58		886,8	-0,26909
13	18	28	4	2008	163,48		957,3167	-0,27529
14	43	6	5	2008	163,44		1150,733	-0,27777

Quadro A5.5 – Ensaio de evaporação, provete AMP 5.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
15	59	19	3	2008	158,19	16,55	0	0
17	43	19	3	2008	158,04		1,733333	-0,00906
18	13	19	3	2008	158,02		2,233333	-0,01027
18	48	19	3	2008	157,99		2,816667	-0,01208
19	40	19	3	2008	157,95		3,683333	-0,0145
21	38	19	3	2008	157,89		5,65	-0,01812
23	35	19	3	2008	157,85		7,6	-0,02054
10	20	20	3	2008	157,66		18,35	-0,03201
19	11	20	3	2008	157,53		27,2	-0,03987
10	50	22	3	2008	157,07		66,85	-0,06765
14	41	24	3	2008	156,61		118,7	-0,09544
13	5	25	3	2008	156,42		141,1	-0,10692
9	56	27	3	2008	156,08		185,95	-0,12745
13	13	31	4	2008	155,45		285,2333	-0,16551
13	40	4	4	2008	154,99		381,6833	-0,1933
13	50	7	4	2008	154,7		453,85	-0,21081
13	14	11	4	2008	154,41		549,25	-0,22833
13	36	14	4	2008	154,23		621,6167	-0,2392
11	29	17	4	2008	154,08		691,5	-0,24826
8	32	21	4	2008	153,94		784,55	-0,25672
14	47	25	4	2008	153,81		886,8	-0,26457
13	18	28	4	2008	153,71		957,3167	-0,27061
14	43	6	5	2008	153,66		1150,733	-0,27363

Quadro A5.6 – Ensaio de evaporação, provete AMP 6.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
15	59	19	3	2008	166,02	16,53	0	0
17	43	19	3	2008	165,91		1,733333	-0,00665
18	13	19	3	2008	165,89		2,233333	-0,00786
18	48	19	3	2008	165,86		2,816667	-0,00968
19	40	19	3	2008	165,83		3,683333	-0,01149
21	39	19	3	2008	165,77		5,666667	-0,01512
23	35	19	3	2008	165,74		7,6	-0,01694
10	21	20	3	2008	165,54		18,36667	-0,02904
19	12	20	3	2008	165,42		27,21667	-0,0363
10	51	22	3	2008	164,99		66,86667	-0,06231
14	41	24	3	2008	164,5		118,7	-0,09195
13	5	25	3	2008	164,33		141,1	-0,10223
9	57	27	3	2008	163,98		185,9667	-0,12341
13	14	31	4	2008	163,36		285,25	-0,16091
13	41	4	4	2008	162,91		381,7	-0,18813
13	50	7	4	2008	162,62		453,85	-0,20568
13	15	11	4	2008	162,32		549,2667	-0,22382
13	36	14	4	2008	162,13		621,6167	-0,23532
11	30	17	4	2008	161,98		691,5167	-0,24439
8	32	21	4	2008	161,83		784,55	-0,25346
14	48	25	4	2008	161,69		886,8167	-0,26193
13	18	28	4	2008	161,59		957,3167	-0,26798
14	43	6	5	2008	161,52		1150,733	-0,27222

Quadro A5.7 – Ensaio de evaporação, provete AMP 7.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
16	0	19	3	2008	106,48	16,58	0	0
17	44	19	3	2008	106,31		1,733333	-0,01025
18	14	19	3	2008	106,28		2,233333	-0,01206
18	49	19	3	2008	106,25		2,816667	-0,01387
19	41	19	3	2008	106,21		3,683333	-0,01628
21	39	19	3	2008	106,14		5,65	-0,02051
23	36	19	3	2008	106,09		7,6	-0,02352
10	21	20	3	2008	105,88		18,35	-0,03619
19	12	20	3	2008	105,74		27,2	-0,04463
10	51	22	3	2008	105,24		66,85	-0,07479
14	41	24	3	2008	104,78		118,6833	-0,10253
13	6	25	3	2008	104,65		141,1	-0,11037
9	57	27	3	2008	104,44		185,95	-0,12304
13	15	31	4	2008	104,12		285,25	-0,14234
13	41	4	4	2008	103,89		381,6833	-0,15621
13	51	7	4	2008	103,75		453,85	-0,16465
13	15	11	4	2008	103,62		549,25	-0,1725
13	37	14	4	2008	103,54		621,6167	-0,17732
11	30	17	4	2008	103,5		691,5	-0,17973
8	32	21	4	2008	103,48		784,5333	-0,18094
14	49	25	4	2008	103,46		886,8167	-0,18215
13	19	28	4	2008	103,43		957,3167	-0,18395
14	44	6	5	2008	103,4		1150,733	-0,18576

Quadro A5.8 – Ensaio de evaporação, provete AMP 8.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
16	0	19	3	2008	118,87	16,58	0	0
17	44	19	3	2008	118,71		1,733333	-0,00965
18	14	19	3	2008	118,69		2,233333	-0,01086
18	49	19	3	2008	118,66		2,816667	-0,01267
19	41	19	3	2008	118,63		3,683333	-0,01448
21	40	19	3	2008	118,57		5,666667	-0,01809
23	36	19	3	2008	118,54		7,6	-0,0199
10	22	20	3	2008	118,35		18,36667	-0,03136
19	13	20	3	2008	118,24		27,21667	-0,038
10	51	22	3	2008	117,82		66,85	-0,06333
14	42	24	3	2008	117,38		118,7	-0,08987
13	6	25	3	2008	117,2		141,1	-0,10073
9	57	27	3	2008	116,92		185,95	-0,11762
13	15	31	4	2008	116,49		285,25	-0,14355
13	42	4	4	2008	116,18		381,7	-0,16225
13	51	7	4	2008	115,99		453,85	-0,17371
13	15	11	4	2008	115,8		549,25	-0,18517
13	37	14	4	2008	115,7		621,6167	-0,1912
11	30	17	4	2008	115,61		691,5	-0,19663
8	33	21	4	2008	115,56		784,55	-0,19965
14	49	25	4	2008	115,52		886,8167	-0,20206
13	19	28	4	2008	115,47		957,3167	-0,20507
14	44	6	5	2008	115,43		1150,733	-0,20749

Quadro A5.9 – Ensaio de evaporação, provete AMP 9.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
16	0	19	3	2008	133,22	16,58	0	0
17	45	19	3	2008	133,07		1,75	-0,00904
18	15	19	3	2008	133,05		2,25	-0,01025
18	50	19	3	2008	133,02		2,833333	-0,01206
19	42	19	3	2008	132,99		3,7	-0,01387
21	40	19	3	2008	132,92		5,666667	-0,01809
23	36	19	3	2008	132,88		7,6	-0,0205
10	22	20	3	2008	132,67		18,36667	-0,03316
19	14	20	3	2008	132,56		27,23333	-0,0398
10	52	22	3	2008	132,14		66,86667	-0,06512
14	42	24	3	2008	131,69		118,7	-0,09225
13	6	25	3	2008	131,52		141,1	-0,10251
9	58	27	3	2008	131,25		185,9667	-0,11879
13	15	31	4	2008	130,83		285,25	-0,14411
13	42	4	4	2008	130,52		381,7	-0,1628
13	52	7	4	2008	130,31		453,8667	-0,17547
13	16	11	4	2008	130,11		549,2667	-0,18752
13	37	14	4	2008	129,98		621,6167	-0,19536
11	31	17	4	2008	129,87		691,5167	-0,202
8	33	21	4	2008	129,79		784,55	-0,20682
14	49	25	4	2008	129,71		886,8167	-0,21164
13	19	28	4	2008	129,65		957,3167	-0,21526
14	44	6	5	2008	129,61		1150,733	-0,21767

Quadro A5.10 – Ensaio de evaporação, provete AMP 10.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
16	1	19	3	2008	124,93	16,71	0	0
17	45	19	3	2008	124,76		1,733333	-0,01018
18	15	19	3	2008	124,73		2,233333	-0,01197
18	50	19	3	2008	124,7		2,816667	-0,01377
19	42	19	3	2008	124,67		3,683333	-0,01556
21	41	19	3	2008	124,6		5,666667	-0,01975
23	37	19	3	2008	124,55		7,6	-0,02275
10	22	20	3	2008	124,32		18,35	-0,03651
19	14	20	3	2008	124,17		27,21667	-0,04549
10	52	22	3	2008	123,63		66,85	-0,07781
14	43	24	3	2008	123,11		118,7	-0,10894
13	7	25	3	2008	122,93		141,1	-0,11971
9	58	27	3	2008	122,67		185,95	-0,13528
13	16	31	4	2008	122,27		285,25	-0,15922
13	42	4	4	2008	121,98		381,6833	-0,17658
13	52	7	4	2008	121,8		453,85	-0,18735
13	16	11	4	2008	121,64		549,25	-0,19693
13	38	14	4	2008	121,55		621,6167	-0,20232
11	31	17	4	2008	121,49		691,5	-0,20591
8	34	21	4	2008	121,44		784,55	-0,2089
14	50	25	4	2008	121,41		886,8167	-0,2107
13	20	28	4	2008	121,37		957,3167	-0,21309
14	45	6	5	2008	121,32		1150,733	-0,21608

Quadro A5.11 – Ensaio de evaporação, provete AMP 11.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
16	1	19	3	2008	126,58	16,55	0	0
17	46	19	3	2008	126,43		1,75	-0,00907
18	16	19	3	2008	126,4		2,25	-0,01088
18	50	19	3	2008	126,37		2,816667	-0,01269
19	43	19	3	2008	126,35		3,7	-0,0139
21	41	19	3	2008	126,28		5,666667	-0,01813
23	38	19	3	2008	126,25		7,616667	-0,01994
10	23	20	3	2008	126,02		18,36667	-0,03385
19	14	20	3	2008	125,88		27,21667	-0,04231
10	52	22	3	2008	125,42		66,85	-0,07011
14	43	24	3	2008	124,94		118,7	-0,09912
13	7	25	3	2008	124,76		141,1	-0,11
9	58	27	3	2008	124,51		185,95	-0,12511
13	16	31	4	2008	124,08		285,25	-0,1511
13	43	4	4	2008	123,77		381,7	-0,16983
13	53	7	4	2008	123,58		453,8667	-0,18131
13	17	11	4	2008	123,38		549,2667	-0,1934
13	38	14	4	2008	123,27		621,6167	-0,20005
11	32	17	4	2008	123,18		691,5167	-0,20549
8	34	21	4	2008	123,1		784,55	-0,21033
14	50	25	4	2008	123,04		886,8167	-0,21395
13	20	28	4	2008	123		957,3167	-0,21637
14	45	6	5	2008	122,97		1150,733	-0,21818

Quadro A5.12 – Ensaio de evaporação, provete AMP 12.

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
16	1	19	3	2008	113,86	16,33	0	0
17	46	19	3	2008	113,71		1,75	-0,00918
18	16	19	3	2008	113,69		2,25	-0,01041
18	51	19	3	2008	113,66		2,833333	-0,01224
19	43	19	3	2008	113,63		3,7	-0,01408
21	42	19	3	2008	113,56		5,683333	-0,01837
23	38	19	3	2008	113,52		7,616667	-0,02082
10	23	20	3	2008	113,29		18,36667	-0,0349
19	15	20	3	2008	113,17		27,23333	-0,04224
10	53	22	3	2008	112,73		66,86667	-0,06918
14	43	24	3	2008	112,32		118,7	-0,09428
13	8	25	3	2008	112,18		141,1167	-0,10286
9	59	27	3	2008	111,99		185,9667	-0,11449
13	17	31	4	2008	111,7		285,2667	-0,13224
13	43	4	4	2008	111,49		381,7	-0,1451
13	53	7	4	2008	111,34		453,8667	-0,15428
13	17	11	4	2008	111,18		549,2667	-0,16408
13	39	14	4	2008	111,08		621,6333	-0,1702
11	32	17	4	2008	111,01		691,5167	-0,17449
8	36	21	4	2008	110,94		784,5833	-0,17877
14	50	25	4	2008	110,89		886,8167	-0,18183
13	21	28	4	2008	110,85		957,3333	-0,18428
14	45	6	5	2008	110,82		1150,733	-0,18612

Quadro A5.13 – Ensaio de evaporação, provete AM1 1 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	55	19	3	2008	158,22	16,15	0	0
18	23	19	3	2008	158,2		0,466667	-0,00124
18	58	19	3	2008	158,19		1,05	-0,00186
19	49	19	3	2008	158,18		1,9	-0,00248
21	49	19	3	2008	158,15		3,9	-0,00433
23	43	19	3	2008	158,13		5,8	-0,00557
10	30	20	3	2008	158,05		16,58333	-0,01052
19	22	20	3	2008	157,99		25,45	-0,01424
10	58	22	3	2008	157,8		65,05	-0,026
14	50	24	3	2008	157,64		116,9167	-0,03591
13	13	25	3	2008	157,58		139,3	-0,03962
10	6	27	3	2008	157,49		184,1833	-0,04519
13	23	31	4	2008	157,35		283,4667	-0,05386
13	48	4	4	2008	157,21		379,8833	-0,06253
13	58	7	4	2008	157,14		452,05	-0,06686
13	22	11	4	2008	157,07		547,45	-0,0712
13	44	14	4	2008	157,02		619,8167	-0,07429
11	37	17	4	2008	156,98		689,7	-0,07677
8	42	21	4	2008	156,95		782,7833	-0,07863
14	56	25	4	2008	156,92		885,0167	-0,08048
13	30	28	4	2008	156,89		955,5833	-0,08234
14	51	6	5	2008	156,87		1148,933	-0,08358

Quadro A5.14 – Ensaio de evaporação, provete AM1 2 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	56	19	3	2008	165,76	16,46	0	0
18	23	19	3	2008	165,74		0,45	-0,00122
18	58	19	3	2008	165,73		1,033333	-0,00182
19	50	19	3	2008	165,72		1,9	-0,00243
21	50	19	3	2008	165,69		3,9	-0,00425
23	44	19	3	2008	165,67		5,8	-0,00547
10	30	20	3	2008	165,58		16,56667	-0,01094
19	22	20	3	2008	165,51		25,43333	-0,01519
10	59	22	3	2008	165,32		65,05	-0,02674
14	51	24	3	2008	165,15		116,9167	-0,03707
13	14	25	3	2008	165,1		139,3	-0,0401
10	6	27	3	2008	165,01		184,1667	-0,04557
13	23	31	4	2008	164,86		283,45	-0,05469
13	49	4	4	2008	164,71		379,8833	-0,0638
13	58	7	4	2008	164,61		452,0333	-0,06988
13	23	11	4	2008	164,54		547,45	-0,07413
13	44	14	4	2008	164,47		619,8	-0,07838
11	37	17	4	2008	164,43		689,6833	-0,08081
8	42	21	4	2008	164,39		782,7667	-0,08324
14	56	25	4	2008	164,36		885	-0,08507
13	30	28	4	2008	164,33		955,5667	-0,08689
14	52	6	5	2008	164,3		1148,933	-0,08871

Quadro A5.15 – Ensaio de evaporação, provete AM1 3 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	56	19	3	2008	160,56	15,97	0	0
18	23	19	3	2008	160,54		0,45	-0,00125
18	59	19	3	2008	160,53		1,05	-0,00188
19	50	19	3	2008	160,52		1,9	-0,0025
21	50	19	3	2008	160,5		3,9	-0,00376
23	44	19	3	2008	160,49		5,8	-0,00438
10	31	20	3	2008	160,42		16,58333	-0,00876
19	23	20	3	2008	160,37		25,45	-0,0119
10	59	22	3	2008	160,22		65,05	-0,02129
14	51	24	3	2008	160,07		116,9167	-0,03068
13	14	25	3	2008	160,02		139,3	-0,03381
10	6	27	3	2008	159,93		184,1667	-0,03944
13	24	31	4	2008	159,8		283,4667	-0,04758
13	49	4	4	2008	159,66		379,8833	-0,05635
13	58	7	4	2008	159,57		452,0333	-0,06198
13	23	11	4	2008	159,5		547,45	-0,06636
13	44	14	4	2008	159,45		619,8	-0,06949
11	38	17	4	2008	159,41		689,7	-0,072
8	43	21	4	2008	159,38		782,7833	-0,07387
14	57	25	4	2008	159,34		885,0167	-0,07638
13	30	28	4	2008	159,31		955,5667	-0,07826
14	52	6	5	2008	159,29		1148,933	-0,07951

Quadro A5.16 – Ensaio de evaporação, provete AM1 4 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	56	19	3	2008	162,12	16,20	0	0
18	24	19	3	2008	162,11		0,466667	-0,00062
18	59	19	3	2008	162,1		1,05	-0,00123
19	51	19	3	2008	162,08		1,916667	-0,00247
21	51	19	3	2008	162,05		3,916667	-0,00432
23	45	19	3	2008	162,03		5,816667	-0,00556
10	31	20	3	2008	161,93		16,58333	-0,01173
19	23	20	3	2008	161,86		25,45	-0,01605
10	59	22	3	2008	161,64		65,05	-0,02963
14	52	24	3	2008	161,47		116,9333	-0,04013
13	14	25	3	2008	161,42		139,3	-0,04321
10	7	27	3	2008	161,33		184,1833	-0,04877
13	24	31	4	2008	161,18		283,4667	-0,05803
13	49	4	4	2008	161,03		379,8833	-0,06729
13	59	7	4	2008	160,93		452,05	-0,07346
13	23	11	4	2008	160,86		547,45	-0,07779
13	45	14	4	2008	160,8		619,8167	-0,08149
11	38	17	4	2008	160,75		689,7	-0,08458
8	43	21	4	2008	160,72		782,7833	-0,08643
14	57	25	4	2008	160,68		885,0167	-0,0889
13	31	28	4	2008	160,65		955,5833	-0,09075
14	52	6	5	2008	160,63		1148,933	-0,09198

Quadro A5.17 – Ensaio de evaporação, provete AM1 5 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	57	19	3	2008	166,25	16,76	0	0
18	24	19	3	2008	166,23		0,45	-0,00119
18	59	19	3	2008	166,22		1,033333	-0,00179
19	51	19	3	2008	166,21		1,9	-0,00239
21	51	19	3	2008	166,18		3,9	-0,00418
23	45	19	3	2008	166,17		5,8	-0,00477
10	32	20	3	2008	166,07		16,58333	-0,01074
19	23	20	3	2008	166,02		25,43333	-0,01372
11	0	22	3	2008	165,8		65,05	-0,02685
14	52	24	3	2008	165,63		116,9167	-0,03699
13	15	25	3	2008	165,57		139,3	-0,04057
10	7	27	3	2008	165,46		184,1667	-0,04713
13	25	31	4	2008	165,32		283,4667	-0,05549
13	50	4	4	2008	165,17		379,8833	-0,06444
13	59	7	4	2008	165,08		452,0333	-0,06981
13	24	11	4	2008	165		547,45	-0,07458
13	45	14	4	2008	164,94		619,8	-0,07816
11	39	17	4	2008	164,9		689,7	-0,08054
8	44	21	4	2008	164,86		782,7833	-0,08293
14	57	25	4	2008	164,83		885	-0,08472
13	31	28	4	2008	164,78		955,5667	-0,0877
14	53	6	5	2008	164,76		1148,933	-0,0889

Quadro A5.18 – Ensaio de evaporação, provete AM1 6 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	57	19	3	2008	164,18	16,71	0	0
18	25	19	3	2008	164,17		0,466667	-0,0006
19	0	19	3	2008	164,16		1,05	-0,0012
19	52	19	3	2008	164,15		1,916667	-0,0018
21	52	19	3	2008	164,12		3,916667	-0,00359
23	45	19	3	2008	164,11		5,8	-0,00419
10	32	20	3	2008	164,02		16,58333	-0,00958
19	24	20	3	2008	163,96		25,45	-0,01317
11	0	22	3	2008	163,78		65,05	-0,02394
14	52	24	3	2008	163,63		116,9167	-0,03292
13	16	25	3	2008	163,57		139,3167	-0,03651
10	7	27	3	2008	163,48		184,1667	-0,0419
13	25	31	4	2008	163,34		283,4667	-0,05028
13	50	4	4	2008	163,19		379,8833	-0,05926
13	59	7	4	2008	163,11		452,0333	-0,06404
13	24	11	4	2008	163,04		547,45	-0,06823
13	46	14	4	2008	162,98		619,8167	-0,07182
11	39	17	4	2008	162,93		689,7	-0,07482
8	44	21	4	2008	162,89		782,7833	-0,07721
14	58	25	4	2008	162,86		885,0167	-0,07901
13	31	28	4	2008	162,83		955,5667	-0,0808
14	53	6	5	2008	162,81		1148,933	-0,082

Quadro A5.19 – Ensaio de evaporação, provete AM1 7 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	58	19	3	2008	128,79	16,65	0	0
18	25	19	3	2008	128,78		0,45	-0,0006
19	1	19	3	2008	128,76		1,05	-0,0018
19	52	19	3	2008	128,75		1,9	-0,0024
21	52	19	3	2008	128,72		3,9	-0,0042
23	46	19	3	2008	128,71		5,8	-0,00481
10	33	20	3	2008	128,62		16,58333	-0,01021
19	24	20	3	2008	128,57		25,43333	-0,01321
11	0	22	3	2008	128,41		65,03333	-0,02282
14	53	24	3	2008	128,29		116,9167	-0,03003
13	16	25	3	2008	128,26		139,3	-0,03183
10	7	27	3	2008	128,21		184,15	-0,03484
13	25	31	4	2008	128,15		283,45	-0,03844
13	51	4	4	2008	128,08		379,8833	-0,04265
13	59	7	4	2008	128,04		452,0167	-0,04505
13	24	11	4	2008	128,02		547,4333	-0,04625
13	46	14	4	2008	127,99		619,8	-0,04805
11	39	17	4	2008	127,97		689,6833	-0,04925
8	45	21	4	2008	127,97		782,7833	-0,04925
14	58	25	4	2008	127,97		885	-0,04925
13	32	28	4	2008	127,95		955,5667	-0,05045
14	54	6	5	2008	127,94		1148,933	-0,05105

Quadro A5.20 – Ensaio de evaporação, provete AM1 8 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	58	19	3	2008	123,06	16,20	0	0
18	26	19	3	2008	123,04		0,466667	-0,00123
19	2	19	3	2008	123,02		1,066667	-0,00247
19	52	19	3	2008	123		1,9	-0,0037
21	53	19	3	2008	122,95		3,916667	-0,00679
23	46	19	3	2008	122,94		5,8	-0,00741
10	33	20	3	2008	122,81		16,58333	-0,01544
19	25	20	3	2008	122,74		25,45	-0,01976
11	1	22	3	2008	122,54		65,05	-0,03211
14	53	24	3	2008	122,39		116,9167	-0,04137
13	16	25	3	2008	122,34		139,3	-0,04446
10	8	27	3	2008	122,27		184,1667	-0,04878
13	26	31	4	2008	122,15		283,4667	-0,05619
13	51	4	4	2008	122,03		379,8833	-0,0636
14	0	7	4	2008	121,96		452,0333	-0,06792
13	25	11	4	2008	121,9		547,45	-0,07163
13	46	14	4	2008	121,85		619,8	-0,07471
11	40	17	4	2008	121,82		689,7	-0,07657
8	45	21	4	2008	121,79		782,7833	-0,07842
14	59	25	4	2008	121,77		885,0167	-0,07965
13	32	28	4	2008	121,74		955,5667	-0,08151
14	54	6	5	2008	121,72		1148,933	-0,08274

Quadro A5.21 – Ensaio de evaporação, provete AM1 9 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	59	19	3	2008	117,81	16,57	0	0
18	26	19	3	2008	117,8		0,45	-0,0006
19	2	19	3	2008	117,78		1,05	-0,00181
19	53	19	3	2008	117,77		1,9	-0,00241
21	53	19	3	2008	117,73		3,9	-0,00483
23	47	19	3	2008	117,72		5,8	-0,00543
10	33	20	3	2008	117,62		16,56667	-0,01147
19	25	20	3	2008	117,56		25,43333	-0,01509
11	1	22	3	2008	117,37		65,03333	-0,02655
14	54	24	3	2008	117,21		116,9167	-0,03621
13	17	25	3	2008	117,16		139,3	-0,03922
10	8	27	3	2008	117,08		184,15	-0,04405
13	26	31	4	2008	116,96		283,45	-0,05129
13	51	4	4	2008	116,85		379,8667	-0,05793
14	0	7	4	2008	116,78		452,0167	-0,06215
13	25	11	4	2008	116,74		547,4333	-0,06457
13	47	14	4	2008	116,69		619,8	-0,06759
11	40	17	4	2008	116,66		689,6833	-0,0694
8	45	21	4	2008	116,62		782,7667	-0,07181
14	59	25	4	2008	116,62		885	-0,07181
13	32	28	4	2008	116,59		955,55	-0,07362
14	55	6	5	2008	116,57		1148,933	-0,07483

Quadro A5.22 – Ensaio de evaporação, provete AM1 10 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	59	19	3	2008	117,74	16,57	0	0
18	27	19	3	2008	117,72		0,466667	-0,00121
19	3	19	3	2008	117,7		1,066667	-0,00241
19	53	19	3	2008	117,7		1,9	-0,00241
21	53	19	3	2008	117,66		3,9	-0,00483
23	47	19	3	2008	117,65		5,8	-0,00543
10	34	20	3	2008	117,56		16,58333	-0,01086
19	26	20	3	2008	117,51		25,45	-0,01388
11	1	22	3	2008	117,34		65,03333	-0,02414
14	54	24	3	2008	117,2		116,9167	-0,03258
13	17	25	3	2008	117,15		139,3	-0,0356
10	8	27	3	2008	117,08		184,15	-0,03982
13	26	31	4	2008	116,97		283,45	-0,04646
13	52	4	4	2008	116,87		379,8833	-0,0525
14	0	7	4	2008	116,8		452,0167	-0,05672
13	26	11	4	2008	116,76		547,45	-0,05913
13	47	14	4	2008	116,71		619,8	-0,06215
11	40	17	4	2008	116,68		689,6833	-0,06396
8	46	21	4	2008	116,66		782,7833	-0,06517
14	59	25	4	2008	116,64		885	-0,06637
13	33	28	4	2008	116,62		955,5667	-0,06758
14	55	6	5	2008	116,6		1148,933	-0,06879

Quadro A5.23 – Ensaio de evaporação, provete AM1 11 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	59	19	3	2008	110,71	15,59	0	0
18	27	19	3	2008	110,69		0,466667	-0,00128
19	3	19	3	2008	110,68		1,066667	-0,00192
19	54	19	3	2008	110,68		1,916667	-0,00192
21	54	19	3	2008	110,64		3,916667	-0,00449
23	47	19	3	2008	110,63		5,8	-0,00513
10	34	20	3	2008	110,56		16,58333	-0,00962
19	26	20	3	2008	110,52		25,45	-0,01218
11	2	22	3	2008	110,36		65,05	-0,02244
14	54	24	3	2008	110,26		116,9167	-0,02886
13	18	25	3	2008	110,22		139,3167	-0,03142
10	9	27	3	2008	110,17		184,1667	-0,03463
13	27	31	4	2008	110,11		283,4667	-0,03848
13	52	4	4	2008	110,03		379,8833	-0,04361
14	1	7	4	2008	110		452,0333	-0,04553
13	26	11	4	2008	109,97		547,45	-0,04745
13	48	14	4	2008	109,94		619,8167	-0,04938
11	41	17	4	2008	109,92		689,7	-0,05066
8	46	21	4	2008	109,91		782,7833	-0,0513
15	0	25	4	2008	109,91		885,0167	-0,0513
13	33	28	4	2008	109,89		955,5667	-0,05258
14	55	6	5	2008	109,87		1148,933	-0,05387

Quadro A5.24 – Ensaio de evaporação, provete AM1 12 (45% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	0	19	3	2008	119,25	15,89	0	0
18	28	19	3	2008	119,24		0,466667	-0,00063
19	4	19	3	2008	119,22		1,066667	-0,00189
19	54	19	3	2008	119,22		1,9	-0,00189
21	54	19	3	2008	119,19		3,9	-0,00377
23	48	19	3	2008	119,19		5,8	-0,00377
10	35	20	3	2008	119,12		16,58333	-0,00818
19	27	20	3	2008	119,07		25,45	-0,01132
11	2	22	3	2008	118,92		65,03333	-0,02076
14	55	24	3	2008	118,8		116,9167	-0,02831
13	18	25	3	2008	118,75		139,3	-0,03146
10	9	27	3	2008	118,7		184,15	-0,0346
13	27	31	4	2008	118,59		283,45	-0,04152
13	52	4	4	2008	118,51		379,8667	-0,04656
14	1	7	4	2008	118,45		452,0167	-0,05033
13	27	11	4	2008	118,41		547,45	-0,05285
13	48	14	4	2008	118,37		619,8	-0,05537
11	41	17	4	2008	118,34		689,6833	-0,05725
8	47	21	4	2008	118,32		782,7833	-0,05851
15	0	25	4	2008	118,31		885	-0,05914
13	33	28	4	2008	118,3		955,55	-0,05977
14	56	6	5	2008	118,28		1148,933	-0,06103

Quadro A5.25 – Ensaio de evaporação, provete AM0 1 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	49	19	3	2008	161,37	16,06	0	0
18	17	19	3	2008	161,36		0,466667	-0,00062
18	52	19	3	2008	161,35		1,05	-0,00125
19	44	19	3	2008	161,33		1,916667	-0,00249
21	43	19	3	2008	161,29		3,9	-0,00498
23	39	19	3	2008	161,27		5,833333	-0,00623
10	24	20	3	2008	161,16		16,58333	-0,01307
19	16	20	3	2008	161,09		25,45	-0,01743
10	53	22	3	2008	160,84		65,06667	-0,03299
14	45	24	3	2008	160,64		116,9333	-0,04544
13	8	25	3	2008	160,58		139,3167	-0,04918
9	59	27	3	2008	160,48		184,1667	-0,0554
13	17	31	4	2008	160,3		283,4667	-0,06661
13	44	4	4	2008	160,16		379,9167	-0,07532
13	53	7	4	2008	160,06		452,0667	-0,08155
13	18	11	4	2008	159,99		547,4833	-0,08591
13	39	14	4	2008	159,93		619,8333	-0,08964
11	32	17	4	2008	159,89		689,7167	-0,09213
8	37	21	4	2008	159,86		782,8	-0,094
14	51	25	4	2008	159,85		885,0333	-0,09462
13	22	28	4	2008	159,83		955,55	-0,09587
14	45	6	5	2008	159,81		1148,933	-0,09711

Quadro A5.26 – Ensaio de evaporação, provete AM0 2 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	49	19	3	2008	164,4	16,16	0	0
18	17	19	3	2008	164,38		0,466667	-0,00124
18	52	19	3	2008	164,37		1,05	-0,00186
19	45	19	3	2008	164,35		1,933333	-0,00309
21	43	19	3	2008	164,32		3,9	-0,00495
23	39	19	3	2008	164,3		5,833333	-0,00619
10	25	20	3	2008	164,18		16,6	-0,01362
19	17	20	3	2008	164,11		25,46667	-0,01795
10	54	22	3	2008	163,84		65,08333	-0,03466
14	45	24	3	2008	163,65		116,9333	-0,04642
13	8	25	3	2008	163,58		139,3167	-0,05076
9	59	27	3	2008	163,48		184,1667	-0,05695
13	18	31	4	2008	163,31		283,4833	-0,06747
13	44	4	4	2008	163,16		379,9167	-0,07675
13	54	7	4	2008	163,05		452,0833	-0,08356
13	18	11	4	2008	162,98		547,4833	-0,0879
13	40	14	4	2008	162,91		619,85	-0,09223
11	33	17	4	2008	162,86		689,7333	-0,09532
8	37	21	4	2008	162,83		782,8	-0,09718
14	52	25	4	2008	162,81		885,05	-0,09842
13	23	28	4	2008	162,79		955,5667	-0,09966
14	45	6	5	2008	162,77		1148,933	-0,10089

Quadro A5.27 – Ensaio de evaporação, provete AM0 3 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	50	19	3	2008	164,66	16,27	0	0
18	18	19	3	2008	164,65		0,466667	-0,00061
18	53	19	3	2008	164,64		1,05	-0,00123
19	45	19	3	2008	164,61		1,916667	-0,00307
21	44	19	3	2008	164,57		3,9	-0,00553
23	39	19	3	2008	164,55		5,816667	-0,00676
10	25	20	3	2008	164,41		16,58333	-0,01537
19	18	20	3	2008	164,33		25,46667	-0,02028
10	54	22	3	2008	164,06		65,06667	-0,03688
14	45	24	3	2008	163,84		116,9167	-0,0504
13	9	25	3	2008	163,77		139,3167	-0,05471
10	0	27	3	2008	163,66		184,1667	-0,06147
13	18	31	4	2008	163,46		283,4667	-0,07376
13	44	4	4	2008	163,31		379,9	-0,08298
13	54	7	4	2008	163,2		452,0667	-0,08974
13	18	11	4	2008	163,12		547,4667	-0,09466
13	40	14	4	2008	163,06		619,8333	-0,09835
11	33	17	4	2008	163,02		689,7167	-0,10081
8	37	21	4	2008	162,98		782,7833	-0,10327
14	52	25	4	2008	162,97		885,0333	-0,10388
13	23	28	4	2008	162,95		955,55	-0,10511
14	46	6	5	2008	162,92		1148,933	-0,10695

Quadro A5.28 – Ensaio de evaporação, provete AM0 4 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	51	19	3	2008	167,59	16,26	0	0
18	18	19	3	2008	167,57		0,45	-0,00123
18	53	19	3	2008	167,56		1,033333	-0,00184
19	45	19	3	2008	167,54		1,9	-0,00307
21	44	19	3	2008	167,5		3,883333	-0,00553
23	40	19	3	2008	167,49		5,816667	-0,00615
10	25	20	3	2008	167,38		16,56667	-0,01291
19	18	20	3	2008	167,31		25,45	-0,01722
10	54	22	3	2008	167,08		65,05	-0,03136
14	46	24	3	2008	166,9		116,9167	-0,04242
13	9	25	3	2008	166,84		139,3	-0,04611
10	0	27	3	2008	166,73		184,15	-0,05288
13	18	31	4	2008	166,56		283,45	-0,06333
13	45	4	4	2008	166,4		379,9	-0,07316
13	55	7	4	2008	166,3		452,0667	-0,07931
13	19	11	4	2008	166,22		547,4667	-0,08423
13	40	14	4	2008	166,15		619,8167	-0,08854
11	34	17	4	2008	166,11		689,7167	-0,09099
8	38	21	4	2008	166,07		782,7833	-0,09345
14	52	25	4	2008	166,05		885,0167	-0,09468
13	23	28	4	2008	166,03		955,5333	-0,09591
14	47	6	5	2008	166		1148,933	-0,09776

Quadro A5.29 – Ensaio de evaporação, provete AM0 5 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	51	19	3	2008	164,64	16,33	0	0
18	19	19	3	2008	164,62		0,466667	-0,00122
18	53	19	3	2008	164,61		1,033333	-0,00184
19	46	19	3	2008	164,6		1,916667	-0,00245
21	45	19	3	2008	164,56		3,9	-0,0049
23	40	19	3	2008	164,55		5,816667	-0,00551
10	26	20	3	2008	164,47		16,58333	-0,01041
19	18	20	3	2008	164,41		25,45	-0,01409
10	55	22	3	2008	164,24		65,06667	-0,0245
14	46	24	3	2008	164,1		116,9167	-0,03307
13	10	25	3	2008	164,05		139,3167	-0,03613
10	0	27	3	2008	163,99		184,15	-0,03981
13	19	31	4	2008	163,86		283,4667	-0,04777
13	45	4	4	2008	163,75		379,9	-0,05451
13	55	7	4	2008	163,68		452,0667	-0,05879
13	19	11	4	2008	163,63		547,4667	-0,06186
13	41	14	4	2008	163,59		619,8333	-0,0643
11	34	17	4	2008	163,56		689,7167	-0,06614
8	38	21	4	2008	163,54		782,7833	-0,06737
14	53	25	4	2008	163,54		885,0333	-0,06737
13	24	28	4	2008	163,52		955,55	-0,06859
14	47	6	5	2008	163,5		1148,933	-0,06982

Quadro A5.30 – Ensaio de evaporação, provete AM0 6 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	52	19	3	2008	163,91	16,34	0	0
18	19	19	3	2008	163,89		0,45	-0,00122
18	54	19	3	2008	163,88		1,033333	-0,00184
19	46	19	3	2008	163,87		1,9	-0,00245
21	45	19	3	2008	163,83		3,883333	-0,0049
23	41	19	3	2008	163,82		5,816667	-0,00551
10	27	20	3	2008	163,7		16,58333	-0,01285
19	19	20	3	2008	163,63		25,45	-0,01713
10	55	22	3	2008	163,42		65,05	-0,02998
14	47	24	3	2008	163,24		116,9167	-0,041
13	10	25	3	2008	163,18		139,3	-0,04467
10	1	27	3	2008	163,09		184,15	-0,05018
13	19	31	4	2008	162,92		283,45	-0,06058
13	45	4	4	2008	162,79		379,8833	-0,06854
13	55	7	4	2008	162,69		452,05	-0,07466
13	20	11	4	2008	162,62		547,4667	-0,07894
13	41	14	4	2008	162,57		619,8167	-0,082
11	34	17	4	2008	162,53		689,7	-0,08445
8	39	21	4	2008	162,5		782,7833	-0,08628
14	53	25	4	2008	162,49		885,0167	-0,08689
13	24	28	4	2008	162,47		955,5333	-0,08812
14	48	6	5	2008	162,45		1148,933	-0,08934

Quadro A5.31 – Ensaio de evaporação, provete AM0 7 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	52	19	3	2008	123,84	16,36	0	0
18	20	19	3	2008	123,82		0,466667	-0,00122
18	54	19	3	2008	123,8		1,033333	-0,00245
19	47	19	3	2008	123,77		1,916667	-0,00428
21	46	19	3	2008	123,73		3,9	-0,00672
23	41	19	3	2008	123,72		5,816667	-0,00734
10	27	20	3	2008	123,6		16,58333	-0,01467
19	19	20	3	2008	123,52		25,45	-0,01956
10	56	22	3	2008	123,3		65,06667	-0,03301
14	47	24	3	2008	123,14		116,9167	-0,04279
13	11	25	3	2008	123,09		139,3167	-0,04585
10	1	27	3	2008	123,01		184,15	-0,05074
13	20	31	4	2008	122,87		283,4667	-0,0593
13	46	4	4	2008	122,76		379,9	-0,06602
13	56	7	4	2008	122,7		452,0667	-0,06969
13	20	11	4	2008	122,64		547,4667	-0,07336
13	41	14	4	2008	122,6		619,8167	-0,07581
11	35	17	4	2008	122,57		689,7167	-0,07764
8	39	21	4	2008	122,54		782,7833	-0,07947
14	53	25	4	2008	122,53		885,0167	-0,08009
13	25	28	4	2008	122,51		955,55	-0,08131
14	48	6	5	2008	122,47		1148,933	-0,08375

Quadro A5.32 – Ensaio de evaporação, provete AM0 8 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	52	19	3	2008	105,94	16,36	0	0
18	20	19	3	2008	105,92		0,466667	-0,00122
18	55	19	3	2008	105,9		1,05	-0,00244
19	47	19	3	2008	105,88		1,916667	-0,00367
21	47	19	3	2008	105,83		3,916667	-0,00672
23	41	19	3	2008	105,81		5,816667	-0,00795
10	27	20	3	2008	105,7		16,58333	-0,01467
19	19	20	3	2008	105,64		25,45	-0,01834
10	56	22	3	2008	105,46		65,06667	-0,02934
14	47	24	3	2008	105,32		116,9167	-0,03789
13	11	25	3	2008	105,28		139,3167	-0,04034
10	1	27	3	2008	105,22		184,15	-0,04401
13	20	31	4	2008	105,11		283,4667	-0,05073
13	46	4	4	2008	105,01		379,9	-0,05684
13	56	7	4	2008	104,96		452,0667	-0,0599
13	20	11	4	2008	104,9		547,4667	-0,06356
13	42	14	4	2008	104,86		619,8333	-0,06601
11	35	17	4	2008	104,84		689,7167	-0,06723
8	40	21	4	2008	104,82		782,8	-0,06845
14	54	25	4	2008	104,81		885,0333	-0,06907
13	25	28	4	2008	104,78		955,55	-0,0709
14	48	6	5	2008	104,76		1148,933	-0,07212

Quadro A5.33 – Ensaio de evaporação, provete AM0 9 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	53	19	3	2008	106,77	15,77	0	0
18	20	19	3	2008	106,75		0,45	-0,00127
18	55	19	3	2008	106,74		1,033333	-0,0019
19	47	19	3	2008	106,72		1,9	-0,00317
21	47	19	3	2008	106,67		3,9	-0,00634
23	42	19	3	2008	106,67		5,816667	-0,00634
10	28	20	3	2008	106,57		16,58333	-0,01268
19	20	20	3	2008	106,52		25,45	-0,01585
10	57	22	3	2008	106,35		65,06667	-0,02663
14	48	24	3	2008	106,22		116,9167	-0,03487
13	11	25	3	2008	106,18		139,3	-0,03741
10	2	27	3	2008	106,12		184,15	-0,04121
13	21	31	4	2008	106		283,4667	-0,04882
13	46	4	4	2008	105,92		379,8833	-0,0539
13	56	7	4	2008	105,86		452,05	-0,0577
13	21	11	4	2008	105,83		547,4667	-0,0596
13	42	14	4	2008	105,78		619,8167	-0,06277
11	35	17	4	2008	105,77		689,7	-0,06341
8	40	21	4	2008	105,74		782,7833	-0,06531
14	54	25	4	2008	105,75		885,0167	-0,06468
13	25	28	4	2008	105,74		955,5333	-0,06531
14	49	6	5	2008	105,72		1148,933	-0,06658

Quadro A5.34 – Ensaio de evaporação, provete AM0 10 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	53	19	3	2008	105,04	16,21	0	0
18	21	19	3	2008	105,02		0,466667	-0,00123
18	56	19	3	2008	105		1,05	-0,00247
19	48	19	3	2008	104,99		1,916667	-0,00308
21	47	19	3	2008	104,94		3,9	-0,00617
23	42	19	3	2008	104,92		5,816667	-0,0074
10	28	20	3	2008	104,81		16,58333	-0,01419
19	20	20	3	2008	104,74		25,45	-0,01851
10	57	22	3	2008	104,54		65,06667	-0,03085
14	48	24	3	2008	104,39		116,9167	-0,0401
13	12	25	3	2008	104,34		139,3167	-0,04319
10	2	27	3	2008	104,26		184,15	-0,04812
13	22	31	4	2008	104,12		283,4833	-0,05676
13	47	4	4	2008	104,01		379,9	-0,06355
13	57	7	4	2008	103,93		452,0667	-0,06848
13	21	11	4	2008	103,88		547,4667	-0,07157
13	42	14	4	2008	103,83		619,8167	-0,07465
11	36	17	4	2008	103,81		689,7167	-0,07589
8	41	21	4	2008	103,79		782,8	-0,07712
14	55	25	4	2008	103,78		885,0333	-0,07774
13	26	28	4	2008	103,76		955,55	-0,07897
14	49	6	5	2008	103,75		1148,933	-0,07959

Quadro A5.35 – Ensaio de evaporação, provete AM0 11 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	54	19	3	2008	121,62	15,80	0	0
18	21	19	3	2008	121,6		0,45	-0,00127
18	56	19	3	2008	121,58		1,033333	-0,00253
19	48	19	3	2008	121,57		1,9	-0,00316
21	48	19	3	2008	121,52		3,9	-0,00633
23	42	19	3	2008	121,5		5,8	-0,00759
10	29	20	3	2008	121,4		16,58333	-0,01392
19	21	20	3	2008	121,33		25,45	-0,01835
10	57	22	3	2008	121,11		65,05	-0,03227
14	49	24	3	2008	120,94		116,9167	-0,04303
13	12	25	3	2008	120,88		139,3	-0,04682
10	2	27	3	2008	120,8		184,1333	-0,05188
13	22	31	4	2008	120,67		283,4667	-0,06011
13	47	4	4	2008	120,56		379,8833	-0,06707
13	57	7	4	2008	120,49		452,05	-0,0715
13	21	11	4	2008	120,44		547,45	-0,07466
13	43	14	4	2008	120,41		619,8167	-0,07656
11	36	17	4	2008	120,38		689,7	-0,07846
8	41	21	4	2008	120,37		782,7833	-0,07909
14	55	25	4	2008	120,37		885,0167	-0,07909
13	26	28	4	2008	120,34		955,5333	-0,08099
14	50	6	5	2008	120,32		1148,933	-0,08226

Quadro A5.36 – Ensaio de evaporação, provete AM0 12 (50% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
17	54	19	3	2008	124,16	16,20	0	0
18	22	19	3	2008	124,14		0,466667	-0,00123
18	57	19	3	2008	124,13		1,05	-0,00185
19	49	19	3	2008	124,12		1,916667	-0,00247
21	48	19	3	2008	124,07		3,9	-0,00556
23	43	19	3	2008	124,06		5,816667	-0,00617
10	29	20	3	2008	123,95		16,58333	-0,01297
19	21	20	3	2008	123,89		25,45	-0,01667
10	58	22	3	2008	123,7		65,06667	-0,0284
14	49	24	3	2008	123,53		116,9167	-0,0389
13	13	25	3	2008	123,47		139,3167	-0,0426
10	3	27	3	2008	123,4		184,15	-0,04692
13	22	31	4	2008	123,28		283,4667	-0,05433
13	48	4	4	2008	123,19		379,9	-0,05989
13	57	7	4	2008	123,12		452,05	-0,06421
13	22	11	4	2008	123,09		547,4667	-0,06606
13	43	14	4	2008	123,04		619,8167	-0,06915
11	36	17	4	2008	123		689,7	-0,07162
8	41	21	4	2008	123		782,7833	-0,07162
14	55	25	4	2008	123		885,0167	-0,07162
13	26	28	4	2008	122,98		955,5333	-0,07285
14	50	6	5	2008	122,97		1148,933	-0,07347

Quadro A5.37 – Ensaio de evaporação, provete AM2 1 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	1	19	3	2008	162,17	16,67	0	0
18	28	19	3	2008	162,16		0,45	-0,0006
19	5	19	3	2008	162,14		1,066667	-0,0018
19	55	19	3	2008	162,13		1,9	-0,0024
21	55	19	3	2008	162,1		3,9	-0,0042
23	49	19	3	2008	162,08		5,8	-0,0054
10	35	20	3	2008	161,97		16,56667	-0,01199
19	27	20	3	2008	161,91		25,43333	-0,01559
11	2	22	3	2008	161,64		65,01667	-0,03178
14	55	24	3	2008	161,4		116,9	-0,04618
13	18	25	3	2008	161,31		139,2833	-0,05158
11	49	27	3	2008	161,15		185,8	-0,06117
13	28	31	4	2008	160,91		283,45	-0,07556
13	53	4	4	2008	160,72		379,8667	-0,08696
14	2	7	4	2008	160,58		452,0167	-0,09535
13	27	11	4	2008	160,48		547,4333	-0,10135
13	48	14	4	2008	160,42		619,7833	-0,10495
11	42	17	4	2008	160,37		689,6833	-0,10795
8	47	21	4	2008	160,33		782,7667	-0,11035
15	0	25	4	2008	160,3		884,9833	-0,11215
13	34	28	4	2008	160,27		955,55	-0,11395
14	57	6	5	2008	160,25		1148,933	-0,11514

Quadro A5.38 – Ensaio de evaporação, provete AM2 2 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	1	19	3	2008	164,48	16,52	0	0
18	29	19	3	2008	164,47		0,466667	-0,00061
19	5	19	3	2008	164,45		1,066667	-0,00182
19	56	19	3	2008	164,45		1,916667	-0,00182
21	55	19	3	2008	164,41		3,9	-0,00424
23	49	19	3	2008	164,38		5,8	-0,00605
10	36	20	3	2008	164,26		16,58333	-0,01331
19	28	20	3	2008	164,19		25,45	-0,01755
11	3	22	3	2008	163,91		65,03333	-0,0345
14	56	24	3	2008	163,67		116,9167	-0,04902
13	19	25	3	2008	163,58		139,3	-0,05447
11	49	27	3	2008	163,44		185,8	-0,06294
13	28	31	4	2008	163,22		283,45	-0,07625
13	53	4	4	2008	163,02		379,8667	-0,08836
14	2	7	4	2008	162,9		452,0167	-0,09562
13	28	11	4	2008	162,79		547,45	-0,10228
13	49	14	4	2008	162,72		619,8	-0,10651
11	42	17	4	2008	162,68		689,6833	-0,10893
8	48	21	4	2008	162,64		782,7833	-0,11135
15	1	25	4	2008	162,6		885	-0,11378
13	34	28	4	2008	162,57		955,55	-0,11559
14	57	6	5	2008	162,55		1148,933	-0,1168

Quadro A5.39 – Ensaio de evaporação, provete AM2 3 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	2	19	3	2008	166,43	16,55	0	0
18	29	19	3	2008	166,4		0,45	-0,00181
19	5	19	3	2008	166,38		1,05	-0,00302
19	56	19	3	2008	166,37		1,9	-0,00362
21	56	19	3	2008	166,32		3,9	-0,00665
23	50	19	3	2008	166,28		5,8	-0,00906
10	36	20	3	2008	166,12		16,56667	-0,01873
19	28	20	3	2008	166,03		25,43333	-0,02417
11	3	22	3	2008	165,72		65,01667	-0,04289
14	56	24	3	2008	165,46		116,9	-0,0586
13	19	25	3	2008	165,37		139,2833	-0,06404
11	50	27	3	2008	165,22		185,8	-0,0731
13	29	31	4	2008	164,99		283,45	-0,087
13	54	4	4	2008	164,78		379,8667	-0,09968
14	2	7	4	2008	164,64		452	-0,10814
13	28	11	4	2008	164,54		547,4333	-0,11418
13	49	14	4	2008	164,47		619,7833	-0,11841
11	42	17	4	2008	164,41		689,6667	-0,12204
8	48	21	4	2008	164,37		782,7667	-0,12446
15	1	25	4	2008	164,33		884,9833	-0,12687
13	35	28	4	2008	164,3		955,55	-0,12868
14	58	6	5	2008	164,28		1148,933	-0,12989

Quadro A5.40 – Ensaio de evaporação, provete AM2 4 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	2	19	3	2008	164,36	16,39	0	0
18	30	19	3	2008	164,34		0,466667	-0,00122
19	6	19	3	2008	164,32		1,066667	-0,00244
19	56	19	3	2008	164,31		1,9	-0,00305
21	56	19	3	2008	164,26		3,9	-0,0061
23	50	19	3	2008	164,24		5,8	-0,00732
10	36	20	3	2008	164,1		16,56667	-0,01587
19	29	20	3	2008	164,01		25,45	-0,02136
11	3	22	3	2008	163,69		65,01667	-0,04089
14	57	24	3	2008	163,41		116,9167	-0,05798
13	20	25	3	2008	163,32		139,3	-0,06347
11	50	27	3	2008	163,15		185,8	-0,07384
13	29	31	4	2008	162,91		283,45	-0,08849
13	54	4	4	2008	162,73		379,8667	-0,09947
14	3	7	4	2008	162,62		452,0167	-0,10619
13	28	11	4	2008	162,53		547,4333	-0,11168
13	50	14	4	2008	162,47		619,8	-0,11534
11	43	17	4	2008	162,43		689,6833	-0,11778
8	48	21	4	2008	162,4		782,7667	-0,11961
15	2	25	4	2008	162,37		885	-0,12144
13	35	28	4	2008	162,34		955,55	-0,12327
14	58	6	5	2008	162,32		1148,933	-0,1245

Quadro A5.41 – Ensaio de evaporação, provete AM2 5 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	3	19	3	2008	165,77	16,15	0	0
18	30	19	3	2008	165,74		0,45	-0,00186
19	6	19	3	2008	165,71		1,05	-0,00371
19	57	19	3	2008	165,7		1,9	-0,00433
21	57	19	3	2008	165,65		3,9	-0,00743
23	50	19	3	2008	165,63		5,783333	-0,00867
10	37	20	3	2008	165,5		16,56667	-0,01671
19	29	20	3	2008	165,42		25,43333	-0,02167
11	4	22	3	2008	165,13		65,01667	-0,03962
14	57	24	3	2008	164,9		116,9	-0,05385
13	20	25	3	2008	164,83		139,2833	-0,05819
11	50	27	3	2008	164,7		185,7833	-0,06623
13	29	31	4	2008	164,49		283,4333	-0,07923
13	54	4	4	2008	164,33		379,85	-0,08914
14	3	7	4	2008	164,23		452	-0,09533
13	29	11	4	2008	164,16		547,4333	-0,09966
13	50	14	4	2008	164,1		619,7833	-0,10338
11	43	17	4	2008	164,07		689,6667	-0,10523
8	49	21	4	2008	164,03		782,7667	-0,10771
15	2	25	4	2008	164		884,9833	-0,10957
13	35	28	4	2008	163,97		955,5333	-0,11142
14	59	6	5	2008	163,95		1148,933	-0,11266

Quadro A5.42 – Ensaio de evaporação, provete AM2 6 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	4	19	3	2008	159,86	16,48	0	0
18	31	19	3	2008	159,84		0,45	-0,00121
19	7	19	3	2008	159,83		1,05	-0,00182
19	57	19	3	2008	159,81		1,883333	-0,00303
21	57	19	3	2008	159,78		3,883333	-0,00485
23	51	19	3	2008	159,76		5,783333	-0,00607
10	37	20	3	2008	159,63		16,55	-0,01396
19	29	20	3	2008	159,55		25,41667	-0,01881
11	4	22	3	2008	159,29		65	-0,03459
14	57	24	3	2008	159,06		116,8833	-0,04855
13	20	25	3	2008	158,97		139,2667	-0,05401
11	51	27	3	2008	158,85		185,7833	-0,06129
13	30	31	4	2008	158,64		283,4333	-0,07404
13	55	4	4	2008	158,48		379,85	-0,08375
14	3	7	4	2008	158,38		451,9833	-0,08982
13	29	11	4	2008	158,31		547,4167	-0,09406
13	50	14	4	2008	158,25		619,7667	-0,09771
11	43	17	4	2008	158,22		689,65	-0,09953
8	49	21	4	2008	158,19		782,75	-0,10135
15	3	25	4	2008	158,16		884,9833	-0,10317
13	35	28	4	2008	158,13		955,5167	-0,10499
15	0	6	5	2008	158,11		1148,933	-0,1062

Quadro A5.43 – Ensaio de evaporação, provete AM2 7 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	4	19	3	2008	115,54	16,73	0	0
18	32	19	3	2008	115,51		0,466667	-0,00179
19	7	19	3	2008	115,49		1,05	-0,00299
19	58	19	3	2008	115,47		1,9	-0,00418
21	57	19	3	2008	115,41		3,883333	-0,00777
23	52	19	3	2008	115,38		5,8	-0,00956
10	38	20	3	2008	115,25		16,56667	-0,01734
19	30	20	3	2008	115,19		25,43333	-0,02092
11	4	22	3	2008	115		65	-0,03228
14	58	24	3	2008	114,85		116,9	-0,04125
13	21	25	3	2008	114,8		139,2833	-0,04424
11	51	27	3	2008	114,72		185,7833	-0,04902
13	30	31	4	2008	114,6		283,4333	-0,05619
13	55	4	4	2008	114,51		379,85	-0,06157
14	3	7	4	2008	114,44		451,9833	-0,06576
13	29	11	4	2008	114,41		547,4167	-0,06755
13	51	14	4	2008	114,36		619,7833	-0,07054
11	44	17	4	2008	114,34		689,6667	-0,07174
8	50	21	4	2008	114,32		782,7667	-0,07293
15	3	25	4	2008	114,3		884,9833	-0,07413
13	36	28	4	2008	114,28		955,5333	-0,07532
15	0	6	5	2008	114,26		1148,933	-0,07652

Quadro A5.44 – Ensaio de evaporação, provete AM2 8 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	5	19	3	2008	127,59	16,48	0	0
18	32	19	3	2008	127,55		0,45	-0,00243
19	8	19	3	2008	127,52		1,05	-0,00425
19	58	19	3	2008	127,5		1,883333	-0,00546
21	58	19	3	2008	127,45		3,883333	-0,0085
23	52	19	3	2008	127,41		5,783333	-0,01093
10	38	20	3	2008	127,25		16,55	-0,02064
19	30	20	3	2008	127,17		25,41667	-0,02549
11	5	22	3	2008	126,93		65	-0,04006
14	58	24	3	2008	126,74		116,8833	-0,05159
13	21	25	3	2008	126,67		139,2667	-0,05584
11	51	27	3	2008	126,57		185,7667	-0,06191
13	30	31	4	2008	126,4		283,4167	-0,07223
13	55	4	4	2008	126,25		379,8333	-0,08133
14	4	7	4	2008	126,15		451,9833	-0,0874
13	30	11	4	2008	126,07		547,4167	-0,09226
13	51	14	4	2008	126,02		619,7667	-0,0953
11	44	17	4	2008	125,99		689,65	-0,09712
8	50	21	4	2008	125,96		782,75	-0,09894
15	3	25	4	2008	125,92		884,9667	-0,10137
13	36	28	4	2008	125,9		955,5167	-0,10258
15	1	6	5	2008	125,88		1148,933	-0,10379

Quadro A5.45 – Ensaio de evaporação, provete AM2 9 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	5	19	3	2008	118,14	16,20	0	0
18	32	19	3	2008	118,1		0,45	-0,00247
19	8	19	3	2008	118,09		1,05	-0,00309
19	58	19	3	2008	118,06		1,883333	-0,00494
21	58	19	3	2008	118,01		3,883333	-0,00803
23	53	19	3	2008	117,97		5,8	-0,0105
10	39	20	3	2008	117,82		16,56667	-0,01976
19	31	20	3	2008	117,72		25,43333	-0,02593
11	5	22	3	2008	117,46		65	-0,04198
14	59	24	3	2008	117,24		116,9	-0,05557
13	21	25	3	2008	117,17		139,2667	-0,05989
11	52	27	3	2008	117,06		185,7833	-0,06668
13	31	31	4	2008	116,9		283,4333	-0,07656
13	56	4	4	2008	116,78		379,85	-0,08397
14	4	7	4	2008	116,69		451,9833	-0,08953
13	30	11	4	2008	116,64		547,4167	-0,09261
13	51	14	4	2008	116,6		619,7667	-0,09508
11	44	17	4	2008	116,57		689,65	-0,09693
8	51	21	4	2008	116,55		782,7667	-0,09817
15	4	25	4	2008	116,53		884,9833	-0,0994
13	37	28	4	2008	116,51		955,5333	-0,10064
15	1	6	5	2008	116,49		1148,933	-0,10187

Quadro A5.46 – Ensaio de evaporação, provete AM2 10 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	5	19	3	2008	122,74	16,38	0	0
18	33	19	3	2008	122,71		0,466667	-0,00183
19	9	19	3	2008	122,7		1,066667	-0,00244
19	59	19	3	2008	122,69		1,9	-0,00305
21	59	19	3	2008	122,65		3,9	-0,00549
23	53	19	3	2008	122,63		5,8	-0,00672
10	39	20	3	2008	122,51		16,56667	-0,01404
19	31	20	3	2008	122,45		25,43333	-0,0177
11	6	22	3	2008	122,25		65,01667	-0,02992
14	59	24	3	2008	122,08		116,9	-0,04029
13	22	25	3	2008	122,01		139,2833	-0,04457
11	52	27	3	2008	121,92		185,7833	-0,05006
13	31	31	4	2008	121,75		283,4333	-0,06044
13	56	4	4	2008	121,59		379,85	-0,07021
14	4	7	4	2008	121,47		451,9833	-0,07753
13	30	11	4	2008	121,39		547,4167	-0,08242
13	52	14	4	2008	121,34		619,7833	-0,08547
11	45	17	4	2008	121,29		689,6667	-0,08852
8	51	21	4	2008	121,26		782,7667	-0,09036
15	4	25	4	2008	121,23		884,9833	-0,09219
13	37	28	4	2008	121,22		955,5333	-0,0928
15	1	6	5	2008	121,2		1148,933	-0,09402

Quadro A5.47 – Ensaio de evaporação, provete AM2 11 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	6	19	3	2008	110,08	16,25	0	0
18	33	19	3	2008	110,05		0,45	-0,00185
19	9	19	3	2008	110,03		1,05	-0,00308
19	59	19	3	2008	110,02		1,883333	-0,00369
21	59	19	3	2008	109,98		3,883333	-0,00615
23	54	19	3	2008	109,96		5,8	-0,00738
10	39	20	3	2008	109,85		16,55	-0,01415
19	31	20	3	2008	109,78		25,41667	-0,01846
11	6	22	3	2008	109,58		65	-0,03077
14	59	24	3	2008	109,41		116,8833	-0,04123
13	22	25	3	2008	109,35		139,2667	-0,04492
11	52	27	3	2008	109,26		185,7667	-0,05046
13	31	31	4	2008	109,11		283,4167	-0,05969
13	57	4	4	2008	108,99		379,85	-0,06707
14	5	7	4	2008	108,9		451,9833	-0,07261
13	31	11	4	2008	108,85		547,4167	-0,07569
13	52	14	4	2008	108,81		619,7667	-0,07815
11	45	17	4	2008	108,78		689,65	-0,08
8	51	21	4	2008	108,75		782,75	-0,08184
15	4	25	4	2008	108,72		884,9667	-0,08369
13	37	28	4	2008	108,71		955,5167	-0,0843
15	2	6	5	2008	108,69		1148,933	-0,08554

Quadro A5.48 – Ensaio de evaporação, provete AM2 12 (60% CV).

Hora	Minuto	Dia	Mês	Ano	Peso	A (cm ²)	tempo (h)	dW/S (g/cm ²)
18	6	19	3	2008	119,69	16,21	0	0
18	34	19	3	2008	119,67		0,466667	-0,00123
19	10	19	3	2008	119,66		1,066667	-0,00185
20	0	19	3	2008	119,65		1,9	-0,00247
22	0	19	3	2008	119,62		3,9	-0,00432
23	54	19	3	2008	119,6		5,8	-0,00555
10	40	20	3	2008	119,5		16,56667	-0,01172
19	32	20	3	2008	119,45		25,43333	-0,0148
11	6	22	3	2008	119,23		65	-0,02837
15	0	24	3	2008	119,03		116,9	-0,04071
13	22	25	3	2008	118,96		139,2667	-0,04503
11	53	27	3	2008	118,85		185,7833	-0,05181
13	32	31	4	2008	118,66		283,4333	-0,06353
13	57	4	4	2008	118,53		379,85	-0,07155
14	5	7	4	2008	118,45		451,9833	-0,07648
13	31	11	4	2008	118,38		547,4167	-0,0808
13	52	14	4	2008	118,33		619,7667	-0,08389
11	45	17	4	2008	118,31		689,65	-0,08512
8	52	21	4	2008	118,29		782,7667	-0,08635
15	5	25	4	2008	118,26		884,9833	-0,0882
13	38	28	4	2008	118,24		955,5333	-0,08944
15	2	6	5	2008	118,22		1148,933	-0,09067

A6

ANEXO 6 – ENSAIO DE DISSOLUÇÃO/CRISTALIZAÇÃO DE SAIS SOLÚVEIS

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes no ensaio de dissolução/cristalização de sais solúveis. Determinou-se a massa inicial (M_0), a massa sem lavagem após os 28 ciclos (M_1) e ainda a massa após lavagem dos provetes no final do ensaio (M_2). Os valores que apresentam um desvio superior a 10% relativamente à média não foram considerados e encontram-se marcados a vermelho.

Quadro A6.1 – Variação da massa dos provetes no ensaio de dissolução/cristalização de sais solúveis .

Proвете	Tipo sup. ensaiada	M ₀ (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	Δ ₁ – sem lavagem	Δ ₂ – após lavagem
AMP 1	moldada	135,27	153,31	137,41	13,34%	1,58%
AMP 2	moldada	138,96	163,66	141,36	17,77%	1,73%
AMP 3	moldada	139,84	159,6	142,31	14,13%	1,77%
AMP 4	moldada	140,42	157,41	142,9	12,10%	1,77%
AMP 5	serrada	128,61	147,54	130,47	14,72%	1,45%
AMP 6	serrada	125,59	143,36	125,31	14,15%	-0,22%
AMP 7	serrada	134,98	154,74	137,3	14,64%	1,72%
AMP 8	serrada	132,54	150,94	134,73	13,88%	1,65%
AM1 1 (45% CV)	moldada	136,73	154,97	136,98	13,34%	0,18%
AM1 2 (45% CV)	moldada	138,8	164,71	138,75	18,67%	-0,04%
AM1 3 (45% CV)	moldada	132,59	153,96	132,7	16,12%	0,08%
AM1 4 (45% CV)	moldada	140,05	166,84	140,25	19,13%	0,14%
AM1 5 (45% CV)	serrada	140,26	170,61	140,33	21,64%	0,05%
AM1 6 (45% CV)	serrada	141,57	166,96	141,7	17,93%	0,09%
AM1 7 (45% CV)	serrada	148,37	173,77	148,43	17,12%	0,04%
AM1 8 (45% CV)	serrada	137,23	161,8	137,41	17,90%	0,13%
AM0 1 (50% CV)	moldada	143,07	168,62	143,38	17,86%	0,22%
AM0 2 (50% CV)	moldada	138,7	160,49	139,23	15,71%	0,38%
AM0 3 (50% CV)	moldada	133,62	156,92	133,78	17,44%	0,12%
AM0 4 (50% CV)	moldada	139,74	162,91	140,34	16,58%	0,43%
AM0 5 (50% CV)	serrada	137,26	167,32	137,65	21,90%	0,28%
AM0 6 (50% CV)	serrada	140,52	168,11	141	19,63%	0,34%
AM0 7 (50% CV)	serrada	138,81	166,59	139,36	20,01%	0,40%
AM0 8 (50% CV)	serrada	145,89	175,9	146,11	20,57%	0,15%
AM2 1 (60% CV)	moldada	144,12	169,58	144,74	17,67%	0,43%
AM2 2 (60% CV)	moldada	143,62	167,66	144,82	16,74%	0,84%
AM2 3 (60% CV)	moldada	147,62	171,04	148,32	15,87%	0,47%
AM2 4 (60% CV)	moldada	152,7	182,25	153,83	19,35%	0,74%
AM2 5 (60% CV)	serrada	118,32	149,49	118,95	26,34%	0,53%
AM2 6 (60% CV)	serrada	152,71	191,04	153,78	25,10%	0,70%
AM2 7 (60% CV)	serrada	135,53	168,55	136,5	24,36%	0,72%
AM2 8 (60% CV)	serrada	129,76	161,65	130,6	24,58%	0,65%

A7

ANEXO 7 – RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO ACELERADA

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes no ensaio de resistência à carbonatação acelerada. Em cada provete foram feitas quatro medições perpendicularmente às direcções X e Y, uma vez que cada provete é composto por duas metades (Figura A7.1).

Quadro A7.1 – Profundidade de carbonatação dos diversos provetes.

Provete	Profundidade de carbonatação							
	perpendicular a X				perpendicular a Y			
	x_1 (mm)	x_2 (mm)	y_1 (mm)	y_2 (mm)	x_1 (mm)	x_2 (mm)	y_1 (mm)	y_2 (mm)
AMP 1	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
AMP 2	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
AMP 3	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
AM1 1 (45% CV)	6,56	5,8	4,3	5,54	4,38	5,43	7,83	7,65
AM1 2 (45% CV)	7,19	7,13	7,84	7,03	5,77	4,8	6,25	5,48
AM1 3 (45% CV)	5,45	6,26	7,56	5,56	6,33	5,02	8,15	8,49
AM0 1 (50% CV)	10,85	8,58	9,26	8,55	8,69	8,62	6,59	6,96
AM0 2 (50% CV)	9,88	10	9,46	9,63	7,89	7,99	10,74	11,38
AM0 3 (50% CV)	10,63	9,5	11,48	9,87	9,92	9,47	11,31	11,67
AM2 1 (60% CV)	21,34	19,26	17,46	24,34	12,46	14,48	14,25	14,5
AM2 2 (60% CV)	14,9	14,56	17,57	19,86	15,5	15,15	11,05	11,74
AM2 3 (60% CV)	21,84	18,09	20,03	28,84	15,35	11,27	12,86	12,16

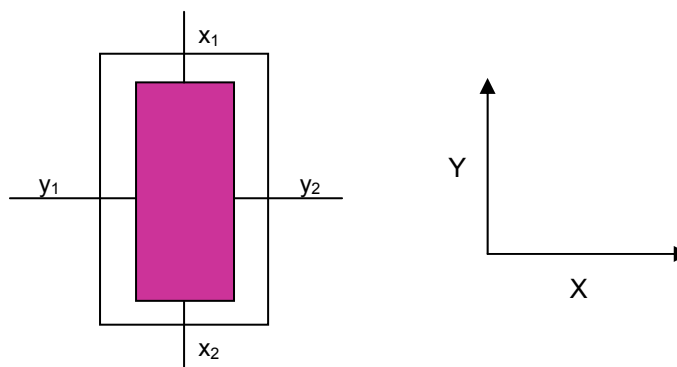


Figura A7.1 – Medição da profundidade de carbonatação.

A8

ANEXO 8 – RESISTÊNCIA À
PENETRAÇÃO DE CLORETOS

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes no ensaio de resistência à penetração de cloretos.

Quadro A8.1 – Profundidades de penetração dos cloretos e coeficientes de difusão (D) dos diversos provetes.

Ensaio 23/04/2008													
Canal	Provete	Profundidade de penetração dos cloretos								U (V)	T (°C)	L (mm)	D ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)
		xd ₁ (mm)	xd ₂ (mm)	xd ₃ (mm)	xd ₄ (mm)	xd ₅ (mm)	xd ₆ (mm)	xd ₇ (mm)	xd (mm)				
C1	AM1 (45% CV)	8,64	9,27	8,93	9,21	10,43	10,46	11,01	9,7	30	21,0	100	7,64
C2	AM2 (60% CV)	29,34	28,54	27,24	25,81	26,49	27,40	30,92	28,0	30	23,0	100	25,13
C3	AMP	24,28	24,49	24,71	24,08	24,68	25,03	25,00	24,6	30	24,0	100	21,93
C4	AMP	26,37	25,36	26,47	27,02	29,46	26,98	26,96	26,9	30	27,5	100	24,47
C5	AM1 (45% CV)	8,36	8,05	9,79	9,66	12,07	12,58	12,77	10,5	30	21,5	100	8,35
C6	AM0 (50% CV)	13,41	12,24	13,07	12,04	12,81	12,79	12,55	12,7	30	23,4	100	10,48
Ensaio 25/04/2008													
Canal	Provete	Profundidade de penetração dos cloretos								U (V)	T (°C)	L (mm)	D ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)
		xd ₁ (mm)	xd ₂ (mm)	xd ₃ (mm)	xd ₄ (mm)	xd ₅ (mm)	xd ₆ (mm)	xd ₇ (mm)	xd (mm)				
C1	AMP	25,57	24,41	25,17	24,65	24,20	23,97	23,52	24,5	30	23,0	100	21,76
C2	AM0 (50% CV)	13,97	13,43	12,89	13,14	12,70	13,54	14,74	13,5	30	23,0	100	11,21
C3	AM2 (60% CV)	25,17	24,95	25,09	23,65	23,25	22,24	22,23	23,8	30	22,5	100	21,05
C4	AM1 (45% CV)	10,18	10,09	9,79	9,35	8,77	9,71	10,15	9,7	30	23,1	100	7,70
C5	AM0 (50% CV)	14,21	12,98	12,50	11,95	11,07	12,30	11,63	12,4	30	22,0	100	10,13
C6	AM2 (60% CV)	25,70	22,57	21,62	23,11	22,60	24,38	28,68	24,1	30	24,0	100	21,43

A9

ANEXO 9 – RESISTÊNCIA AO CALOR

Neste anexo apresentam-se os resultados obtidos para cada um dos provetes no ensaio de resistência ao calor. Os valores que apresentam um desvio superior a 10% relativamente à média não foram considerados e encontram-se marcados a vermelho.

Quadro A9.1 – Resistência à flexão e à compressão de cada um dos provetes no ensaio de resistência ao calor.

Ref. Proвете	Massa Proвете (g)	Ensaio	Valor (kgf)	Resultado (MPa)
AMP (1)	559,1	Flexão	590	13,57
AMP (2)	566,1	Flexão	595	13,68
AMP (3)	568,8	Flexão	525	12,07
AMP (1.1)		Comp.	13800	84,61
AMP (1.2)		Comp.	12600	77,25
AMP (2.1)		Comp.	11600	71,12
AMP (2.2)		Comp.	11050	67,75
AMP (3.1)		Comp.	9800	60,09
AMP (3.2)		Comp.	11500	70,51
AM1 - 45% CV (1)	562,0	Flexão	560	12,88
AM1 - 45% CV (2)	563,9	Flexão	540	12,42
AM1 - 45% CV (3)	554,6	Flexão	540	12,42
AM1 - 45% CV (1.1)		Comp.	9100	55,79
AM1 - 45% CV (1.2)		Comp.	10000	61,31
AM1 - 45% CV (2.1)		Comp.	10700	65,60
AM1 - 45% CV (2.2)		Comp.	11000	67,44
AM1 - 45% CV (3.1)		Comp.	11400	69,90
AM1 - 45% CV (3.2)		Comp.	10200	62,54
AM0 - 50% CV (1)	549,1	Flexão	530	12,19
AM0 - 50% CV (2)	560,0	Flexão	580	13,34
AM0 - 50% CV (3)	566,6	Flexão	560	12,88
AM0 - 50% CV (1.1)		Comp.	10200	62,54
AM0 - 50% CV (1.2)		Comp.	10800	66,22
AM0 - 50% CV (2.1)		Comp.	9700	59,47
AM0 - 50% CV (2.2)		Comp.	10400	63,77
AM0 - 50% CV (3.1)		Comp.	11200	68,67
AM0 - 50% CV (3.2)		Comp.	10900	66,83
AM2 - 60% CV (1)	559,8	Flexão	510	11,73
AM2 - 60% CV (2)	562,1	Flexão	555	12,76
AM2 - 60% CV (3)	557,1	Flexão	575	13,22
AM2 - 60% CV (1.1)		Comp.	10000	61,31
AM2 - 60% CV (1.2)		Comp.	10400	63,77
AM2 - 60% CV (2.1)		Comp.	10800	66,22
AM2 - 60% CV (2.2)		Comp.	11400	69,90
AM2 - 60% CV (3.1)		Comp.	11200	68,67
AM2 - 60% CV (3.2)		Comp.	11400	69,90